

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفزیک

تحلیل برکشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج با استفاده از سیستم های فازی

حسین حامی

استاد راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

استاد مشاور:

مهندس سیامک آذرکشب

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۹۰



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین خامسی رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن تحت عنوان تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج با استفاده از سیستم های فازی که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : خوب امتیاز ۱۷/۵) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰- ۱۹) -- ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر رحمان ترابی	دانشیار	
۲- استاد راهنما	دکتر حسین میرزائی	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندس سیامک آذرگشسب	-	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر محمد عطایی	استاد	
۶- استاد ممتحن	دکتر اسماعیل جلالی	دانشیار	

رئیس دانشکده:



تقدیم بہ

حمید اسرار عمہ عزیزم

تشکر و قدردانی

اینجانب بر خود لازم می‌دانم که از تلاش‌ها و کمک‌های اساتید راهنمای خود، آقایان دکتر سید رحمان ترابی و دکتر حسین میرزائی نصیرآباد کمال تشکر را داشته باشم، که در مسیر تهیه و ارائه این پروژه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند.

در ادامه از آقایان مهندس حمید اسفیدانی و مهندس ذکریا قدیری دوستان عزیزم، کمال تشکر را داشته که اینجانب را در انجام این تحقیق یاری نمودند.

همچنین از آقای مهندس یازرلو و شرکت محترم سابیر، به خاطر همکاری‌های بی دریغشان تشکر می‌نمایم.

در پایان از خانواده‌ام که در تمامی مراحل زندگی، مشوق من بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب حسین خامسی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن، گرایش استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه "تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج، با استفاده از سیستم‌های فازی" تحت راهنمایی

دکتر سید رحمان ترابی و دکتر حسین میرزائی نصیرآباد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۱/۳/۲



امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

مبنای اصلی و تعیین کننده در تحلیل پایداری، طراحی و ارائه سیستم نگهداری سازه زیرزمینی، اطلاع از خصوصیات ژئومکانیکی محیط دربرگیرنده سازه زیرزمینی است. بدین منظور از نتایج رفتار سنجی و تحلیل برگشتی به عنوان ابزاری برای تخمین مجدد داده‌های ورودی در حین اجرا و پس از احداث سازه استفاده می‌شود. روش‌های مورد استفاده در تحلیل برگشتی جابجایی پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک به دو گروه روش معکوس و روش مستقیم تقسیم می‌گردد. در روش معکوس، معکوس نمودن معادلات حاکم بر مسأله مستلزم فرضیات ساده‌سازی نظیر محیط یکنواخت، میدان تنش خطی یکنواخت و حفاری تک مرحله ای است. در روش مستقیم نیز بهینه‌سازی تابع هدف، مستلزم تصحیح متعدد پارامترها است که تصحیح هر یک نیاز به حداقل یک محاسبه دارد. بنابراین حل عددی به خصوص برای مدل‌های بزرگ، زمان‌گیر است. علاوه بر این در روش مستقیم، رابطه بین جابجایی و پارامترهای مکانیکی شدیداً غیرخطی و فضای جستجو بزرگ و چند بعدی است. اخیراً برای غلبه بر محدودیت‌های این روش‌ها، روش‌های هوشمند تحلیل برگشتی ارائه شده اند.

در این مطالعه ۳ نوع سیستم فازی برای تعیین بازگشتی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌خاک و شرایط تنش منطقه‌ای از کیلومتر ۳/۴ تا ۱۳/۷ در پروژه خط ۲ مترو کرج با روش تحلیل برگشتی هوشمند طراحی شدند. بدین منظور با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا و مطالعات زمین‌شناسی و مدل‌سازی عددی تونل پروژه خط ۲ مترو کرج با نرم افزار Plaxis 3D Tunnel زوج داده‌های ورودی - خروجی مورد نیاز برای طراحی سیستم‌های فازی تولید شد. سپس ۳ سیستم فازی

با ساختار موتور استنتاج ضرب، فازی‌ساز منفرد، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز و توابع عضویت گوسین، برای تحلیل برگشتی هوشمند با ورودی‌های شماره گروه خاکی، خصوصیات توده‌خاک و شرایط تنش منطقه و خروجی میزان نشست سطحی، با استفاده از روش‌های آموزش گرادیان نزولی، الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات و الگوریتم رقابت استعماری طراحی شدند. تعیین تعداد قواعد فازی، توسط خوشه‌بندی با روش نزدیک‌ترین همسایه، هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی انجام شد. برای بررسی عملکرد سیستم‌های فازی طراحی شده، از نتایج حاصل از قرائت‌های نشست سنجی ثبت شده در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی پروژه خط ۲ مترو کرج استفاده شد. برای تعیین ورودی‌های معادل با میزان نشست ثبت شده در ایستگاه‌های نشست سنجی در هر سیستم فازی، از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شد. نتایج نشان دادند که هر ۳ سیستم از عملکرد بسیار خوبی برخوردارند و سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات با معیار $MSE = 0.0065$ دارای بهترین عملکرد می‌باشد.

کلمات کلیدی: تحلیل برگشتی هوشمند، تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، سیستم‌های فازی، الگوریتم‌های تکاملی، خط ۲ مترو کرج.

فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱- کلیات..... ۲

۲-۱- ضرورت انجام پایان نامه..... ۳

۳-۱- هدف از انجام پایان نامه..... ۴

۴-۱- ساختار پایان نامه..... ۵

فصل دوم: رفتار سنجی و تحلیل برگشتی..... ۷

۱-۲- رفتار سنجی..... ۸

۲-۱-۱- هدف های رفتارسنجی..... ۹

۲-۱-۲- نقش رفتار سنجی در مراحل مختلف طرح و اجرای سازه ها..... ۱۰

۲-۱-۳- مراحل کار در رفتارسنجی..... ۱۱

۲-۱-۴- سیستم های رفتارسنجی..... ۱۳

۲-۱-۴-۱- نشست سنج..... ۱۴

۲-۲- تحلیل برگشتی..... ۱۷

۲-۲-۱- مقدمه..... ۱۷

۲-۲-۲- تحلیل برگشتی و تحلیل معمولی..... ۱۹

۲-۲-۳- سابقه علمی تحلیل برگشتی..... ۲۲

۲-۲-۴- انواع روش های تحلیل برگشتی..... ۲۴

۲-۲-۴-۱- تحیل برگشتی معکوس..... ۲۴

۲-۲-۴-۲- تحلیل برگشتی مستقیم..... ۲۷

۲-۲-۴-۳- تحلیل برگشتی هوشمند..... ۳۰

۳-۲- نتیجه‌گیری ۳۳

فصل سوم: مفاهیم سیستم‌های فازی و طراحی آنها با استفاده از

زوج داده‌های ورودی - خروجی ۳۴

۱-۳- مقدمه ۳۵

۲-۳- ساختار سیستم‌های فازی ۳۸

۳-۲-۱- پایگاه قواعد فازی ۴۰

۳-۲-۲- موتور استنتاج فازی ۴۱

۳-۲-۳- فازی‌سازها ۴۲

۳-۲-۴- غیرفازی‌سازها ۴۳

۳-۳- طراحی سیستم‌های فازی از روی زوج‌های ورودی - خروجی ۴۶

۳-۳-۱- طراحی سیستم‌های فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۴۷

۳-۳-۱-۱- الگوریتم طراحی سیستم فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۵۰

۳-۳-۲- طراحی سیستم‌های فازی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی ۵۱

۳-۳-۱-۲- الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات ۵۲

۳-۳-۲-۲- الگوریتم رقابت استعماری ۵۶

۳-۴- نتیجه‌گیری ۶۴

فصل چهارم: تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج ۶۶

۱-۴- معرفی پروژه خط ۲ مترو کرج ۶۷

۴-۱-۱- مشخصات عمومی منطقه ۶۷

۴-۱-۲- مشخصات عمومی طرح ۶۷

۴-۱-۳- شرایط زمین‌شناسی مهندسی محدوده پروژه ۶۹

۴-۱-۴- لایه‌های خاک شناسایی شده ۷۰

۴-۱-۴-۱- تشریح گروه‌های خاک ۷۱

۴-۱-۴-۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده گروه‌های خاک ۷۴

۴-۱-۵- روش حفاری تونل ۷۶

۴-۱-۶- نحوه حفاری و خاک برداری در متروی کرج ۷۸

۴-۱-۷- سیستم نگهداری اولیه در متروی کرج ۷۹

۴-۱-۸- بررسی نتایج قرائت ابزار نشست سنجی در کیلومتر ۹/۱۵ ۸۱

۴-۱-۸-۱- بررسی ایستگاه نشست سنجی (R7-N2-S-9+150) ۸۱

۴-۲- نشست در اثر حفر تونل ۸۴

۸۴	۳-۴- مدل سازی تونل پروژه خط ۲ مترو کرج.....
۸۴	۴-۳-۱- روش های عددی
۸۷	۴-۳-۱-۱- انتخاب مناسب ترین روش عددی
	۴-۳-۲- مدل سازی تونل با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel جهت محاسبه
۸۷	نشست در سطح زمین
۸۷	۴-۳-۱-۲- نرم افزار Plaxis 3D Tunnel
	۴-۳-۲-۲- مراحل مدل سازی با توجه به اصول مدل سازی عددی و همچنین
۸۹	ترتیب عملیات اجرایی
۱۰۵	۴-۴- طراحی سیستم های فازی برای تحلیل برگشتی هوشمند
۱۰۵	۴-۴-۱- تعیین پارامترهای ورودی سیستم های فازی برای تحلیل برگشتی هوشمند
۱۰۹	۴-۴-۲- تولید زوج داده های مورد نیاز برای طراحی سیستم فازی
	۴-۴-۳- تعیین تعداد قوانین فازی با استفاده از خوشه بندی با روش نزدیک ترین
۱۱۰	همسایه
	۴-۴-۴- تعیین پارامترهای مجهول سیستم های فازی با استفاده از زوج داده های
۱۱۲	ورودی - خروجی
۱۱۲	۴-۴-۱- طراحی سیستم فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی
۱۱۶	۴-۴-۲- طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم های تکاملی
۱۱۶	۴-۴-۱-۲- طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO
۱۲۰	۴-۴-۲-۲- طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری
۱۲۴	۴-۴-۵- تحلیل برگشتی هوشمند ایستگاه های نشست سنجی خط ۲ مترو کرج
۱۲۸	۴-۴-۶- اعتبار سنجی سیستم های فازی طراحی شده برای تحلیل برگشتی هوشمند
۱۳۴	۴-۵- نتیجه گیری
۱۳۶	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۳۷	۶-۱- مقدمه
۱۳۸	۶-۲- نتیجه گیری
۱۳۹	۶-۳- پیشنهادات
۱۴۰	منابع

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۴- فلوچارت سازماندهی پایان‌نامه	۶
شکل ۲-۱- مراحل کار در رفتارسنجی	۱۲
شکل ۲-۲- ایستگاه نشست سنجی سطحی همراه گل میخ‌ها	۱۶
شکل ۲-۳- پین نشست سنج نصب شده در سطح خیابان	۱۷
شکل ۲-۴- ارتباط تحلیل معمولی و برگشتی	۱۹
شکل ۲-۵- مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی	۲۱
شکل ۲-۶- مراحل طراحی و اجرا یک ساختار	۲۲
شکل ۲-۷- طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار	۳۰
شکل ۳-۱- تعریف عضویت در مجموعه کلاسیک و فازی	۳۶
شکل ۳-۲- قسمت‌های اصلی تابع عضویت	۳۶
شکل ۳-۳- چهار نوع از معمول‌ترین توابع عضویت	۳۷
شکل ۳-۴- ساختار اصلی سیستم‌های فازی با فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز	۴۰
شکل ۳-۵- شبکه سه لایه پیش‌خور سه مرحله‌ای	۴۸
شکل ۳-۶- اساس کار الگوریتم PSO	۵۵
شکل ۳-۷- فلوچارت استاندارد الگوریتم PSO	۵۶
شکل ۳-۸- شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری	۵۸
شکل ۳-۹- حرکت واقعی مستعمرات به سمت امپریالیست	۶۰
شکل ۳-۱۰- فلوچارت استاندارد الگوریتم رقابت استعماری	۶۴
شکل ۴-۱- فازهای حفاری خط ۲ متروی شهری کرج	۶۹
شکل ۴-۲- نمایش گروه‌های خاکی کیلومترهای مختلف مسیر حفاری فاز ۱	
خط ۲ مترو کرج در فواصل مختلف از مسیر بر حسب متر	۷۱
شکل ۴-۳- نمایش وضعیت لایه‌بندی خاک در گروه خاکی ۱	۷۲

- شکل ۴-۴- نمایش وضعیت لایه‌بندی خاک در گروه خاکی ۲ ۷۲
- شکل ۴-۵- نمایش وضعیت لایه‌بندی خاک در گروه خاکی ۳ ۷۳
- شکل ۴-۶- نمایش وضعیت لایه‌بندی خاک در گروه خاکی ۴ ۷۴
- شکل ۴-۷- مراحل حفاری تونل، Heading و Benching ۷۹
- شکل ۴-۸- ترتیب مراحل حفاری تونل در مترو کرج ۷۹
- شکل ۴-۹- شکل هندسی و مقاطع فرم‌ها ۸۰
- شکل ۴-۱۰- میزان نشست نسبت به زمان قرائت، در ایستگاه (R7-N2-S-9+150) ۸۲
- شکل ۴-۱۱- میزان نشست نسبت به فاصله از جبهه‌کار در ایستگاه (R7-N2-S-9+150) ۸۳
- شکل ۴-۱۲- نشست تجمعی نسبت به زمان قرائت در ایستگاه (R7-N2-S-9+150) ۸۳
- شکل ۴-۱۳- انواع روش‌های عددی ۸۶
- شکل ۴-۱۴- نمایی از پنجره نخست نرم افزار Plaxis 3D Tunnel ۸۹
- شکل ۴-۱۵- نمایش ۳ بعدی ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل ۹۰
- شکل ۴-۱۶- مشخصات نیم مقطع تونل ۹۲
- شکل ۴-۱۷- نمایش پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۳-۴) ۹۴
- شکل ۴-۱۸- وضعیت تنش‌ها بعد از به تعادل رساندن مدل مربوط به گروه خاکی ۴ ۹۵
- شکل ۴-۱۹- چهار فاز متوالی از شروع حفر بخش فوقانی تونل، در خاک مربوط ۹۶
- به گروه ۴ با گام حفاری ۱ متر ۹۶
- شکل ۴-۲۰- چهار فاز متوالی از پایان حفر بخش فوقانی تونل، در خاک مربوط ۹۶
- به گروه ۴ با گام حفاری ۱ متر و ۲۰ فاز ساخت مرحله‌ای ۹۷
- شکل ۴-۲۱- وضعیت نهایی پس از اتمام حفر بخش فوقانی تونل در خاک مربوط ۹۷
- به گروه ۴ با گام حفاری ۱ متر ۹۸
- شکل ۴-۲۲- نمودار نشست سنجی ایستگاه (R8-E5-S-11+950) ۹۹
- شکل ۴-۲۳- نمودار تاثیر پیشروی سینه کار بر میزان نشست در ایستگاه ۹۹
- (R8-E5-S-11+950) ۹۹
- شکل ۴-۲۴- نمودار تاثیر زمان بر میزان نشست در ایستگاه (R8-E5-S-11+950) ۱۰۰
- شکل ۴-۲۵- نمایش نقطه در نظر گرفته شده برای بررسی نشست ۱۰۱
- شکل ۴-۲۶- نمایش گرافیکی جابه‌جایی‌های کل بعد از اتمام حفاری بخش ۱۰۱
- فوقانی تونل ۱۰۲
- شکل ۴-۲۷- نمایش گرافیکی جابه‌جایی‌های قائم بعد از اتمام حفاری بخش ۱۰۲
- فوقانی تونل ۱۰۲
- شکل ۴-۲۸- نمایش گرافیکی جابه‌جایی‌های افقی در راستای محور تونل بعد از ۱۰۲
- اتمام حفاری بخش فوقانی تونل ۱۰۳

- شکل ۴-۲۹- نمایش گرافیکی کرنش‌های حجمی کل بعد از اتمام حفاری بخش
 فوقانی تونل ۱۰۳
- شکل ۴-۳۰- نمایش گرافیکی کرنش‌های برشی کل بعد از اتمام حفاری بخش
 فوقانی تونل ۱۰۴
- شکل ۴-۳۱- نمایش گرافیکی تنش‌های متوسط بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی
 تونل ۱۰۴
- شکل ۴-۳۲- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر مدول الاستیسیته ۱۰۷
- شکل ۴-۳۳- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر نسبت تنش‌ها ۱۰۷
- شکل ۴-۳۴- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر چسبندگی ۱۰۷
- شکل ۴-۳۵- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر زاویه اصطکاک داخلی ۱۰۸
- شکل ۴-۳۶- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر نسبت پواسون ۱۰۸
- شکل ۴-۳۷- خوشه‌بندی شش ورودی با روش نزدیک‌ترین همسایه به ۲ خوشه ۱۱۱
- شکل ۴-۳۸- فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۱۱۳
- شکل ۴-۳۹- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 نسبت تنش‌ها، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۱۱۵
- شکل ۴-۴۰- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 چسبندگی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۱۱۵
- شکل ۴-۴۱- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 مدول الاستیسیته، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۱۱۵
- شکل ۴-۴۲- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 شماره گروه خاکی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی ۱۱۶
- شکل ۴-۴۳- فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO ۱۱۷
- شکل ۴-۴۴- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 نسبت تنش‌ها، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO ۱۱۹
- شکل ۴-۴۵- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 چسبندگی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO ۱۱۹
- شکل ۴-۴۶- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 مدول الاستیسیته، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO ۱۱۹
- شکل ۴-۴۷- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 شماره گروه خاکی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO ۱۲۰
- شکل ۴-۴۸- فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۱۲۱
- شکل ۴-۴۹- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 نسبت تنش‌ها، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۱۲۲

- شکل ۴-۵۰- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 چسبندگی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۱۲۳
 شکل ۴-۵۱- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 مدول الاستیسیته، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۱۲۳
 شکل ۴-۵۲- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی
 شماره گروه خاکی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۱۲۳
 شکل ۴-۵۳- فلوجارت تحلیل برگشتی هوشمند توسط الگوریتم رقابت
 استعماری، برای سیستم‌های فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان
 نزولی و الگوریتم رقابت استعماری ۱۲۶
 شکل ۴-۵۴- فلوجارت تحلیل برگشتی هوشمند توسط الگوریتم PSO، برای
 سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO ۱۲۶
 شکل ۴-۵۵- مقایسه نشست محاسبه شده با استفاده از مقادیر تخمین زده شده
 توسط سیستم فازی طراحی شده با روش گرادیان نزولی و نشست به دست آمده از قرائت
 نشست سنجی، در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی ۱۳۲
 شکل ۴-۵۶- مقایسه نشست محاسبه شده با استفاده از مقادیر تخمین زده شده
 توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO و نشست به دست آمده از قرائت
 نشست سنجی، در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی ۱۳۲
 شکل ۴-۵۷- مقایسه نشست محاسبه شده با استفاده از مقادیر تخمین زده شده
 توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری و نشست به دست آمده
 از قرائت نشست سنجی، در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی ۱۳۳

فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- پارامترهای مورد سنجش در رفتار سنجی	۱۴
جدول ۲-۲- چند مورد از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه مستقیم
تابع هدف توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی برای تحلیل برگشتی	۳۱
جدول ۳-۲- چند مورد از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه تابع هدف
توسط سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی برای تحلیل برگشتی	۳۲
جدول ۱-۴- توصیف خاک لایه‌های تشکیل دهنده گروه خاکی ۱ و ارتفاع آن‌ها	۷۲
جدول ۲-۴- توصیف خاک لایه‌های تشکیل دهنده گروه خاکی ۲ و ارتفاع آن‌ها	۷۳
جدول ۳-۴- توصیف خاک لایه‌ی تشکیل دهنده گروه خاکی ۳ و ارتفاع آن	۷۳
جدول ۴-۴- توصیف خاک لایه‌های تشکیل دهنده گروه خاکی ۴ و ارتفاع آن‌ها	۷۴
جدول ۵-۴- مقادیر و مشخصات لایه‌های خاک مورد مطالعه	۷۶
جدول ۶-۴- مشخصات کمان‌های نیم مقطع تونل	۹۲
جدول ۷-۴- پارامترهای معادل محاسبه شده برای برش یک متری از بتن	۹۲
جدول ۸-۴- پارامترهای مورد نیاز برای توصیف نگهداری در نرم افزار Plaxis	۹۳
جدول ۹-۴- اطلاعات آماری حاصل از گمانه‌های حفر شده در حد فاصل کیلومتر
۳/۴ الی ۶/۶ مربوط به لایه (SC) , (SM) , (GC) , (GM)	۱۱۰
جدول ۱۰-۴- محدوده تغییرات تعیین شده برای خصوصیات توده‌خاک، حد فاصل
۳/۴ الی ۶/۶ مربوط به لایه (SC) , (SM) , (GC) , (GM)	۱۱۰
جدول ۱۱-۴- نتایج حاصل از خوشه‌بندی زوج داده‌های ورودی - خروجی،
هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی	۱۱۱
جدول ۱۲-۴- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی،
برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی، (\bar{x}_i^l)	۱۱۴
جدول ۱۳-۴- مقادیر به دست آمده برای بازشدگی توابع عضویت متغیرهای
ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی، (σ_i^l)	۱۱۴

- جدول ۴-۱۴- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی،
 برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی، (\bar{y}^l) ۱۱۴
- جدول ۴-۱۵- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی،
 برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO، (\bar{x}_i^l) ۱۱۸
- جدول ۴-۱۶- مقادیر به دست آمده برای بازشدگی توابع عضویت متغیرهای ورودی،
 برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO، (σ_i^l) ۱۱۸
- جدول ۴-۱۷- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی،
 برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO، (\bar{y}^l) ۱۱۸
- جدول ۴-۱۸- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی،
 برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، (\bar{x}_i^l) ۱۲۱
- جدول ۴-۱۹- مقادیر به دست آمده برای بازشدگی توابع عضویت متغیرهای
 ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، (σ_i^l) ۱۲۲
- جدول ۴-۲۰- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی،
 برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، (\bar{y}^l) ۱۲۲
- جدول ۴-۲۱- نشست ناشی از حفر بخش فوقانی تونل در ۲۰ ایستگاه نشست
 سنجی انتخاب شده ۱۲۴
- جدول ۴-۲۲- نوع الگوریتم تکاملی مورد استفاده برای تخمین مقادیر ورودی
 سیستم‌های فازی طراحی شده، به نحوی که میزان تابع هزینه حداقل گردد ۱۲۵
- جدول ۴-۲۳- نتایج حاصل از تحلیل برگشتی هوشمند ۲۰ ایستگاه نشست سنجی
 توسط الگوریتم PSO، برای سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO ۱۲۷
- جدول ۴-۲۴- میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر
 تخمین‌زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با روش گرادیان نزولی و نشست به
 دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی‌متر ۱۲۹
- جدول ۴-۲۵- میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر
 تخمین‌زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO و نشست به
 دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی‌متر ۱۳۰
- جدول ۴-۲۶- نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر
 تخمین‌زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری و
 نشست به دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱
 میلی‌متر ۱۳۱
- جدول ۴-۲۷- مقدار معیار MSE هر یک از سیستم‌های فازی طراحی شده ۱۳۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات

در طول دهه‌های اخیر انواع مختلفی از روش‌های عددی مثل روش المان‌های محدود، المان‌های مرزی و المان‌های مجزا در حل مسایل مهندسی به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها امروزه به طور وسیعی در طراحی فضاهای زیرزمینی مثل تونل‌ها، مغارهای زیرزمینی، شیب‌ها و پی سدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این در حالی است که هنوز هم پیش بینی رفتار مکانیکی ساختگاه‌ها با دقت مناسب امکان پذیر نیست. قابلیت اعتماد فرضیات طراحی به طور کامل به دقت اطلاعات ورودی تحلیل بستگی دارد. به طوری که اگر این اطلاعات به اندازه کافی دقیق نباشند و یا نماینده مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی محیط مورد نظر نباشند، پیش بینی صحیح رفتار توده سنگ و یا خاک مشکل خواهد بود.

دانستن حالات تنش‌های اولیه زمین و پارامترهای ژئومکانیکی، هم برای فهم بهتر رفتار ساختگاه‌ها و هم برای مدل کردن صحیح محیط، با استفاده از روش عددی ضروری است. تنش‌های اولیه نیز مانند پارامترهای ژئومکانیکی، از روش‌های متنوعی محاسبه می‌شوند. کاملاً روشن است که نتایج این روش‌ها در حالت کلی پراکندگی محسوسی را نشان می‌دهند، هر چند دقت لازم نیز در انجام آزمایش‌ها به کار رفته باشد. این پراکندگی مربوط به ناهمسان‌گردی زمین و تغییرات طبیعی خواص خاک و سنگ در اطراف فضای حفاری است. از طرفی دیگر رفتار توده باید با توجه به شکل و ابعاد تونل محاسبه گردد. این بدان معنی است که نتایج حاصل از آزمایش‌های برجا نمی‌تواند

به طور مستقیم به عنوان داده‌های ورودی طراحی مورد استفاده قرار گیرند و دقت زیادی در تفسیر و توضیح نتایج این آزمایش‌ها لازم است.

برای غلبه بر این مشکلات، در طی فرآیند اجرای پروژه، رفتارسنجی انجام می‌شود و این نه تنها به خاطر کنترل پایداری سازه‌ها، بلکه برای تخمین مجدد پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی است که در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hudson, 1992).

۱-۲- ضرورت و سابقه انجام پایان‌نامه

مطالعه رفتار مکانیکی توده سنگ مستلزم تعیین پارامترهای ژئومکانیکی آن است. در حوزه مهندسی سنگ و خاک، سعی بر این است تا با استفاده از روش‌های غیرمستقیم و کم‌هزینه حداکثر اطلاعات از توده سنگ و خاک به دست آید. یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه استفاده از تحلیل برگشتی است. به طور عام، روش‌های مورد استفاده در تحلیل برگشتی جابجایی پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود: روش معکوس و روش مستقیم. حل عددی سریع، یکی از مزایای روش معکوس است. برای تعیین معکوس معادله سیستم، برخی از فرضیات ساده‌ساز نظیر محیط یکنواخت، میدان تنش خطی یکنواخت و حفاری تک مرحله‌ای، در نظر گرفته می‌شود. اما در برخی موارد، بزرگ مقیاس بودن پروژه‌ها که منجر به چندگانگی محیط می‌شود، پیچیدگی میدان تنش اولیه که غالباً ناشی از توپوگرافی و چندگانگی محیط است، طولانی بودن دوره احداث و در نتیجه مطرح شدن تأثیرات وابسته به زمان در انواع خاصی از سنگ‌ها و مشکل بودن رفتارنگاری همزمان با عملیات حفر، استفاده از روش معکوس را مشکل کرده است. علاوه بر این، اجرای این روش برای مسائل غیرخطی بسیار مشکل است. روش مستقیم، برای کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک مناسب‌تر است. با این وجود، بهینه‌سازی تابع هدف در روش مستقیم مستلزم تصحیح متعدد پارامترها است که تصحیح هر پارامتر نیاز به حداقل یک محاسبه دارد. حل عددی نیز به خصوص برای مدل‌های بزرگ، زمان‌گیر است و جابجایی‌های ثابت شده، ممکن است پراکنده و تابع هدف دارای نقاط مینیمم

محلی زیادی باشد. روش مستقیم با دو مشکل مواجه است: یکی اینکه رابطه بین جابجایی و پارامترهای ژئومکانیکی شدیداً غیرخطی است و دیگر آن که فضای جستجو بزرگ و چند بعدی است. ضرورت رفع مشکلات روش مستقیم، باعث به وجود آمدن تحلیل برگشتی هوشمند شد، زیرا استفاده از شبکه‌های عصبی و یا سیستم‌های فازی راه حل مناسبی برای یافتن رابطه شدیداً غیرخطی بین جابجایی و پارامترهای ژئومکانیکی است. همچنین الگوریتم‌های تکاملی دارای سرعت و دقت بالایی، برای یافتن حداقل توابع هدفی با فضای جستجو بزرگ و چند بعدی هستند.

در سال ۲۰۰۲ شانگ^۱ و همکاران در تحقیقی از الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی تابع هدف و تحلیل برگشتی هوشمند پارامترهای E و K_0 استفاده نمودند و سپس در همان سال در تحقیقی مجزا از تحلیل برگشتی هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی تابع هدف برای تعیین پارامترهای E و λ استفاده کردند. در سال ۲۰۰۷ وانگ^۲ و همکاران از شبکه‌های عصبی برای تعیین رابطه غیرخطی پارامترهای ورودی و خروجی نرم افزارهای عددی و سپس از الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی تابع هدف به منظور تحلیل برگشتی هوشمند پارامترهای E و G استفاده نمودند. در سال ۲۰۰۸ لی^۳ و همکاران از شبکه‌های عصبی برای تعیین رابطه غیرخطی پارامترهای ورودی و خروجی نرم افزارهای عددی در بررسی رفتار خطی و غیر خطی خاک تونل‌های کم عمق استفاده نمودند و سپس از الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی تابع هدف به منظور تحلیل برگشتی هوشمند پارامترهای E و G استفاده کردند.

۱-۳- هدف از انجام پایان نامه

اطمینان از صحت انتخاب پارامترهای مقاومتی خاک و شرایط تنش‌های منطقه که از مطالعات ژئوتکنیکی به دست آمده‌اند، یکی از موضوعات مهم در طرح‌های عمرانی به خصوص در حفر تونل و

¹ -Shang

² -Wang

³ -Lee

مترو است. بررسی رفتار توده‌سنگ یا خاک (رفتار سنجی) در حین حفاری و اجرای طرح به خصوص در زمین‌های ضعیف از روش‌های جدید در اجرای تونل است.

هدف از انجام این تحقیق، طراحی سیستمی هوشمند برای تحلیل برگشتی نتایج ابزارهای نشست سنجی در تونل خط ۲ متروی قطار شهری کرج با استفاده از سیستم‌های فازی است، تا بتوان از آن تا زمان اتمام پروژه برای تحلیل برگشتی نتایج قرائت‌های ایستگاه‌های نشست سنجی با دقت و سرعت بسیار بالا استفاده نمود. بدین منظور با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا و مطالعات زمین‌شناسی و مدل‌سازی عددی تونل پروژه خط ۲ مترو کرج با نرم افزار Plaxis 3D Tunnel، زوج داده‌های ورودی - خروجی مورد نیاز برای طراحی سیستم‌های فازی تولید می‌شود. برای تعیین تعداد قواعد فازی از خوشه‌بندی با روش نزدیک‌ترین همسایه، هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی با استفاده از روش‌های آموزش گرادیان نزولی، بهینه‌سازی جمعی ذرات و الگوریتم رقابت استعماری استفاده می‌شود. در نهایت برای محاسبه شرایط تنش منطقه‌ای و پارامترهای ژئومکانیکی معادل با میزان نشست ثبت شده در ایستگاه‌های نشست سنجی، از الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۵ فصل به شرح زیر تدوین شده است:

در فصل اول (فصل پیش‌رو)، کلیات، ضرورت انجام پایان‌نامه، هدف از انجام آن و ساختار گزارش پایان‌نامه بیان شده است.

در فصل دوم تحت عنوان رفتارسنجی و تحلیل برگشتی، مفاهیم و ابزارهای رفتار سنجی معرفی شده و سپس در مورد تحلیل برگشتی و تحلیل عادی توضیح داده شده و روش‌های تحلیل برگشتی بیان شده است.

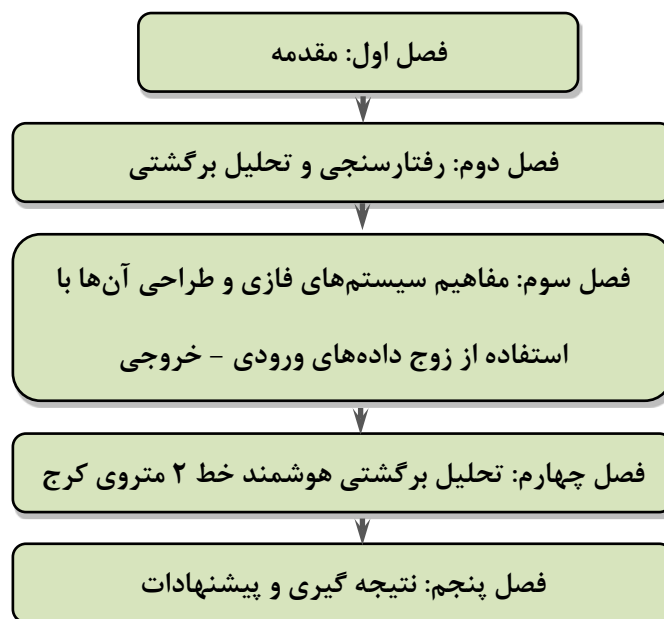
در فصل سوم تحت عنوان مفاهیم سیستم‌های فازی و طراحی آن‌ها با استفاده از زوج داده‌های

ورودی - خروجی، ابتدا مفهوم سیستم‌های فازی بیان شده و سپس ساختار سیستم‌های فازی و روش‌های طراحی آن‌ها با استفاده از زوج داده‌های ورودی - خروجی، انتخاب و تشریح شده است.

فصل چهارم تحت عنوان تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ متروی کرج می‌باشد. در این فصل فرآیند مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel توضیح داده شده و سپس با طراحی سیستم‌های فازی تحلیل برگشتی هوشمند صورت گرفته است و نتایج به دست آمده از تحلیل برگشتی هوشمند با نتایج رفتارسنجی ثبت شده توسط نشست سنج‌ها مقایسه شده است.

فصل پنجم نیز مربوط به نتایج تحقیق و پیشنهادها می‌باشد.

روندنما نحوه سازماندهی پایان‌نامه، در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- رondenma سازماندهی پایان‌نامه

فصل دوم

رفتار سنجی و تحلیل برکشتی

۲-۱- رفتار سنجی

تحلیل و بررسی پایداری یکی از اصول مهندسی مکانیک خاک و سنگ در پروژه‌های زیر زمینی و یا هر سازه احداث شده در خاک و سنگ است. به این منظور همواره پژوهش‌گران به دنبال دستیابی به روش‌هایی، برای بررسی‌های ایمن و اقتصادی در پروژه‌های عظیم زیرزمینی بوده‌اند و گاهی از روی تجربه نیز اصولی برای بررسی‌های پایداری در سازه‌های زیرزمینی ارائه شده است. ارائه روش مناسب حفاری، نوع و سرعت مجاز حفاری و همچنین به کارگیری سیستم نگهداری اقتصادی‌تر در عین حفظ ایمنی از مسائل مورد بررسی در تحلیل پایداری است. روش‌های تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها را می‌توان در سه گروه اصلی روش‌های ریاضی، مشاهده‌ای^۱ و تجربی^۲ تقسیم بندی کرد.

روش‌های مشاهده‌ای بر اساس اندازه‌گیری واقعی حرکات زمین به هنگام حفاری و تحلیل اندرکنش زمین- سیستم نگهداری، بنا شده‌اند که به کمک آن‌ها می‌توان ناپایداری‌ها را مشخص ساخت. این روش‌ها شامل روش‌های تونل‌سازی اتریشی جدید^۳ و محدود سازی هم‌آمدگی^۴ هستند و همچنین در عین حال تنها روش‌های مقایسه نتایج واقعی با نتایجی است که به وسیله روش‌های دیگر، پیش بینی شده است.

¹ -Observational

² -Empirical

³ -New Austrian Tunneling Method (NATM)

⁴ -Convergence confinement

اگر چه قبل از حفر یک سازه زیرزمینی، اطلاعات مناسبی برای طراحی روش اجرا و سیستم نگهداری در دست است اما معمولاً این اطلاعات کافی نیست. بنابراین با استفاده از روش‌های مشاهده‌ای می‌توان سیستم نگهداری پیش‌بینی شده را ارزیابی کرد و پس از انجام اصلاحات لازم، آن را برای سازه زیرزمینی تعمیم داد. اجرای این عملیات را رفتارسنجی^۱ گویند (Bieniawski, 1984).

در بسیاری از طرح‌ها با انجام رفتارسنجی مناسب، می‌توان از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کرد. بنابراین بررسی تغییرات در وضعیت توده‌سنگ با استفاده از ابزار دقیق، اطلاعات لازم را در این مورد فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، در مواردی که اجرای یک طرح زیرزمینی با مشکلات پیش‌بینی نشده‌ای مثل ناپایداری مواجه می‌شود، با رفتارسنجی می‌توان به علت آن پی‌برد، مثل حرکت بیش از حد دیواره تونل که ممکن است ناشی از فشار زیاد آب و یا جابه‌جایی بلوک‌های سنگی باشد. از جمله مزایای دیگر رفتارسنجی، صرفه جویی قابل ملاحظه در هزینه اجرای طرح است که در حدود نیم تا یک درصد هزینه کلی اجرا است (Dunncliff, Gordon, 1988).

۲-۱-۱- هدف‌های رفتارسنجی

رفتارسنجی تاسیسات احداث شده در زیر زمین برای تامین چهار منظور اساسی زیر انجام می‌شود:

۱. ثبت مقادیر طبیعی و نیز تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ژئوتکنیکی مثل سطح آب زیرزمینی، وضعیت طبقات زمین و اتفاقات زمین لرزشی قبل از اجرای یک پروژه مهندسی.
۲. تامین ایمنی ضمن عملیات ساختاری و بهره‌برداری با دادن اخطار به موقع مثل تشدید غیر عادی جابه‌جایی‌های زمین، فشار آب زیر زمینی و بارهای اعمال شده بر اجرای سیستم نگهداری.
۳. کنترل صحت فرضیات، مدل‌های انتخابی و مشخصات توده‌سنگ که در محاسبات مربوط به طراحی به کار می‌روند.

^۱ -Monitoring

۴. کنترل انجام امور ترمیمی و اصلاحی در زمین، مانند تونل‌سازی در زمین‌های حاوی آب، منجمد کردن زمین حین حفر چاه یا تونل، تقویت زمین با عملیات تزریقی و زه‌کشی. سیستم‌های رفتارسنجی که در ارتباط با حفريات زیرزمینی بزرگ مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرند، گاه بسیار پیچیده و پرهزینه‌اند، اما باید توجه داشت که با استفاده از این ابزار می‌توان نتایج ارزشمندی را در چگونگی واکنش توده‌سنگ به دست آورد (Dunncliff, Gordon, 1988).

هدف اصلی بررسی‌های رفتارسنجی برجا، تعیین شرایط پایداری حفريات زیر زمینی با ارائه داده‌های کیفی در مورد رفتار توده‌سنگ و سیستم نگهداری است. اهمیت رفتارسنجی تونل را مدت‌ها پیش رابسویچ^۱ در سال ۱۹۶۴ مطرح ساخت. وی در اتریش، طرحی را بر اساس اندازه‌گیری‌های برجا ارائه کرد که به نام گسترش تجربی^۲ نامیده می‌شد و ادامه کار وی، امروزه بنام روش جدید اتریشی (NATM) شناخته شده است (Dunncliff, Gordon, 1988).

۲-۱-۲- نقش رفتار سنجی در مراحل مختلف طرح و اجرای سازه‌ها

از نقطه نظر زمان رفتارسنجی می‌توان هدف‌ها را به شرح زیر تقسیم بندی کرد (شاهوردیلو، ۱۳۷۹):

- نقش رفتارسنجی در مرحله طراحی

هدف از اقدامات این مرحله، تعیین اطلاعات مورد نیاز برای طراحی فضای زیرزمینی است که از آن جمله می‌توان به ویژگی‌هایی چون مدول تغییرشکل توده‌سنگ و وضعیت تنش‌های برجا اشاره کرد. همچنین با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در فرایند طراحی سازه‌های زیر زمینی لازم است که صحت فرضیات به‌عمل آمده در حین طرح عملاً کنترل شود. هر چند که در بسیاری از موارد این روش امکان‌پذیر نیست.

¹-Rabecwicz

²-Empirical dimensioning

- نقش رفتار سنجی در مرحله اجرا

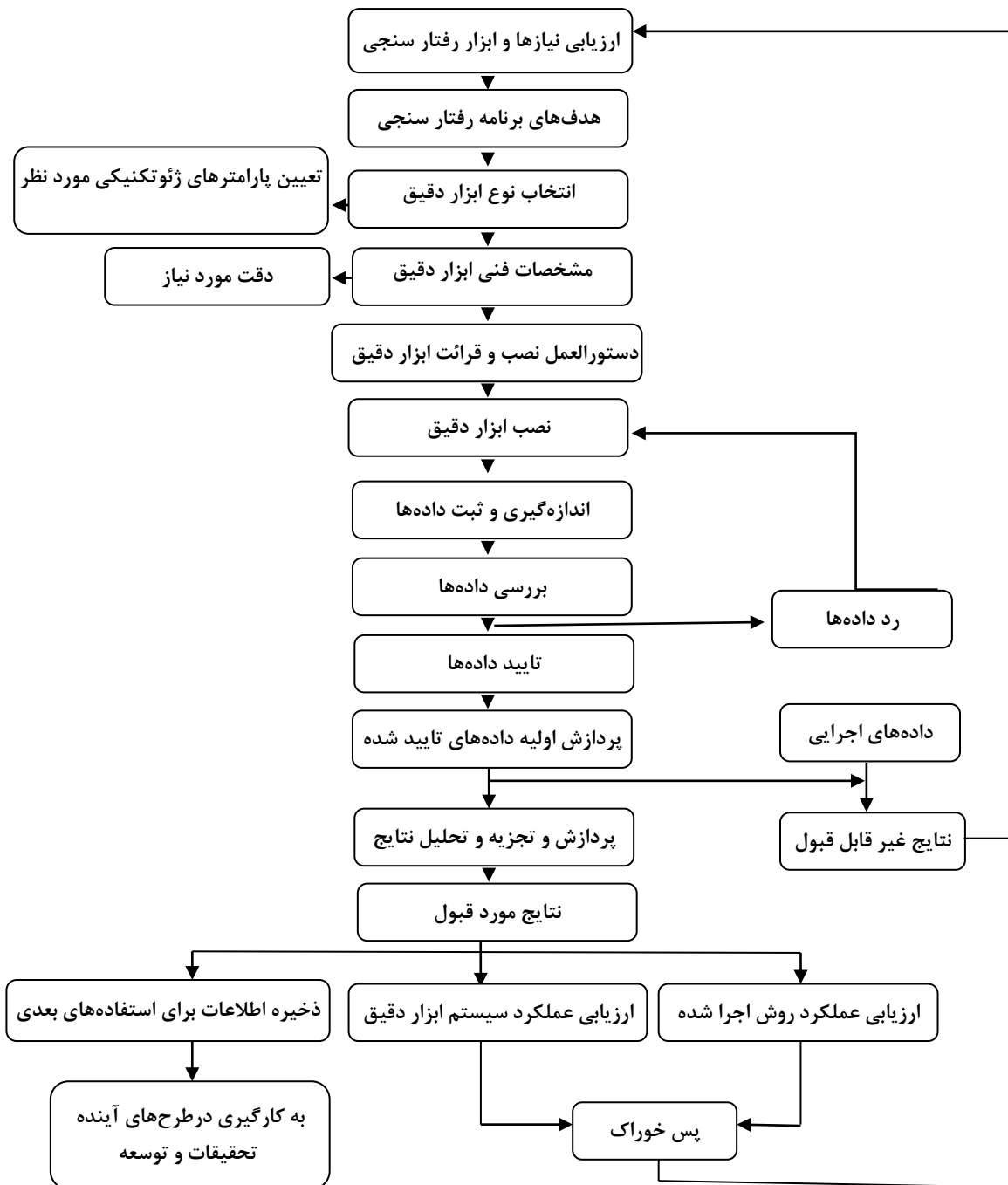
کاربرد اصلی رفتار سنجی در مرحله اجرای پروژه می‌باشد. در این مرحله رفتار سنجی به منظور کنترل ایمنی، بهینه کردن طرح، کنترل عملیات اجرایی و جلب اطمینان عمومی انجام می‌گیرد. در عین حال نکته قابل توجه این است که اهداف ذکر شده در صورتی تحقق می‌یابد که پیشاپیش برنامه ریزی و مطالعه کافی برای حل مشکلات احتمالی انجام شود و در مواجهه با مسائلی که توسط رفتارسنجی آشکار می‌شود راه‌حل‌های دقیق و برنامه ریزی شده در دسترس باشد.

- نقش ابزار بندی بعد از اجرا و هنگام بهره برداری

هدف از استفاده در این مرحله کنترل ایمنی سازه در دوره بهره‌برداری و بررسی عملکرد دراز مدت آن می‌باشد. در سازه‌هایی که بروز مشکل در آن سبب به خطر افتادن جان افراد زیادی می‌گردد، رفتار سنجی در حین بهره برداری کاملاً ضروری است (شاهوردیلو، ۱۳۷۹).

۲-۱-۳- مراحل کار در رفتارسنجی

اگر چه مراحل و نحوه کار در هر برنامه رفتارسنجی، ویژگی‌های خاص خود را دارند، اما به طور کلی می‌توان برای این فرایند مراحل را قایل شد که کمابیش در شرایط مختلف به کار می‌رود (مدنی ج، ۱۳۸۱). این مراحل به صورت نمودار، در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- مراحل کار در رفتارسنجی (مدنی، ۱۳۷۹)

۲-۱-۴- سیستم‌های رفتارسنجی^۱

تولید ابزارهای ژئوتکنیکی، به عنوان وسیله‌ای برای رسیدن به مشاهدات صحرائی در سال‌های

^۱ -Monitoring System

۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ اتفاق افتاد. در ۵۰ سال اول بعد روی کار آمدن این ابزار یک روند عمومی مشاهده می‌شود. در آن سال‌ها بیشتر برنامه‌های ابزاربندی در دست مهندسان سخت کوشی بوده که دید واضحی از هدف و انگیزه کافی برای پیشبرد برنامه داشتند. موفقیت و شکست، هر دو وجود داشت ولی ارتباط بین افراد و ابزار هر روز شنیده می‌شد (Dunncliff, 1988).

در واقع رفتارسنجی مراقبت سازه با مشاهده مستقیم یا با استفاده از تجهیزات خاصی می‌باشد که به وسیله آن می‌توان رفتار فضای احداثی در سنگ را به طور کمی و کیفی کنترل کرد. نتایج ارزشمند سیستم‌های رفتارسنجی به‌طور مستقیم در تحلیل برگشتی استفاده می‌شود و برای به دست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های وارد بر سنگ به کار می‌رود. در این روش با مقایسه تغییرات مورد نظر مانند جابه‌جایی که از مدل به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از ابزار دقیق‌ها می‌توان تحلیل برگشتی دقیقی بر روی سازه مورد نظر انجام داد. به عنوان مثال به هنگام احداث فضای زیرزمینی، تصمیم‌گیری درباره تقویت سیستم نگهداری و یا تغییر در شیوه و یا زمان بندی اجرای آن به عواملی همچون میزان و آهنگ همگرایی دیواره فضای زیرزمینی بستگی دارد. برای اجرای یک برنامه رفتار سنجی مناسب شناخت صحیح از نیازها، انتخاب و ترکیب مناسب ابزار دقیق، انعطاف پذیری، وضعیت نصب صحیح ابزار و حفاظت آن، زمان‌بندی مناسب قرائت و تفسیر و به‌کارگیری درست نتایج الزامی است (شاهوردیلو، ۱۳۷۹).

پارامترهای مورد سنجش در رفتار سنجی و ابزارهای متناسب با آن به طور کلی در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱- پارامترهای مورد سنجش در رفتار سنجی (Sakurai, 1993)

پارامترهای سیستم نگهداری		پارامترهای توده سنگ		
سلول بارسنج ^۲ سلول کرنش سنج ^۴	بار وارده	انحراف سنج ^۲	افقی	جابه‌جایی ^۱
انحنای سنج ^۷	خیز	کشیدگی سنج گمانه‌ای یک نقطه‌ای ^۵ (Spbx) کشیدگی سنج گمانه‌ای چند نقطه‌ای ^۶ (Mpbx) نقاط نشانه میکروژئودزی	قائم و مایل	
متر نواری همگرایی سنج	همگرایی	متر نواری دقیق همگرایی سنج	همگرایی ^۸	
درزه سنج ^{۱۰}	جابه‌جایی درزه	پیزومتر ^۹	فشار آب در درزه	

۲-۱-۴-۱- نشست سنج^{۱۱}

نشست سنج ابزاری است که برای اندازه‌گیری میزان نشست یا بالازدگی سطح زمین یا مصالح زیر آن، به کار گرفته می‌شود. از مهمترین موارد کاربرد این ابزار رفتارنگاری نشست و بالازدگی در حفاری‌ها، پی، سدها و پشته‌های خاکی است. به‌علاوه این ابزار در مواردی چون ستون و دیواره‌های محافظ، بالای فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌های مترو و چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نشست سنج‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند که در ادامه شرح داده می‌شوند (جمشاسب، ۱۳۸۵).

الف) نشست سنج‌های زیر سطحی: برای اندازه‌گیری نشست‌ها و بالازدگی زیر سطحی می‌توان از نشست سنج کاوه لغزنده استفاده کرد. به کمک این ابزار می‌توان علاوه بر تعیین نشست کل، روند تغییرات نشست در همه نقاط را تعیین کرد. اگر آخرین نقطه ثابت باشد می‌توان بدون نیاز به نقشه

¹ -Displacement

² -Inclinometer

³ - Load cell

⁴ - Strain gauge

⁵ - Single Point Borehole Extensometer

⁶ - Multiple Point Borhole Extensometer

⁷ - Curvometer

⁸ - Convergence

⁹ -Piezometer

¹⁰ -Joint meter

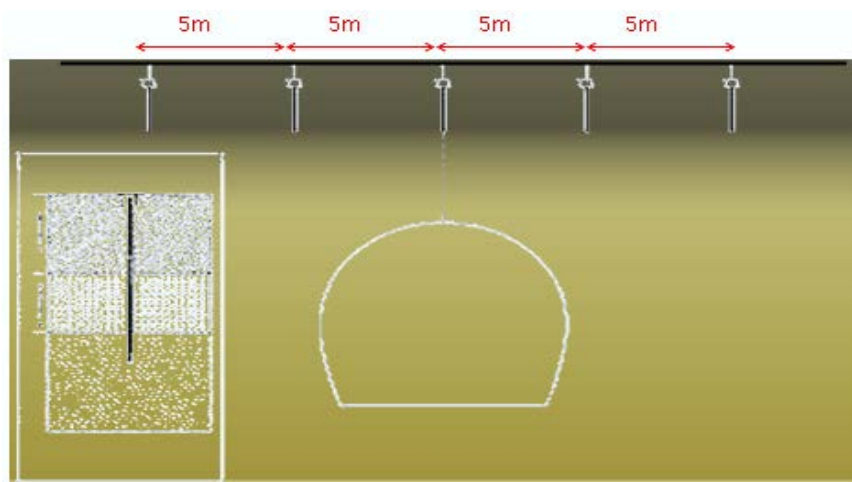
¹¹ Settelment

بردارى، نشست مطلق را اندازه‌گیری کرد.

پس از ارسال کاوه به‌درون لوله راهنما و نزدیکی به محل حلقه‌هایی که از پیش قرار داده شده‌اند، صدایی از ابزار به گوش می‌رسد و مقدار قرائتی ولتاژ، به‌حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این حال، کاربر با توجه به متر نواری متصل به کاوه عمل حلقه را ثبت می‌کند. میزان نشست یا بالازدگی با مقایسه کردن قرائت اولیه با قرائت‌های ثانویه امکان‌پذیر می‌گردد.

ب) نشست سنج‌های سطحی: از نشست سنج‌های سطحی برای اندازه‌گیری طولانی مدت نشست تاج سدها یا سطح پایین دست سدهای خاکی استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها غالباً با ابزارهای نوری یا ترازبایی مثلثاتی انجام می‌شود و اگر بسامد قرائت‌های انجام شده در آینده رو به افزایش باشد، از سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای استفاده می‌شود.

به کمک ابزار پین نشست سنجی می‌توان میزان نشست یا بالازدگی سطح زمین یا زیرسازی سطحی را اندازه‌گیری نمود. در صورت نصب این ابزار در بالای فضای زیرزمینی می‌توان تأثیر احداث فضای زیرزمینی در لایه‌های در برگیرنده را مشخص نمود. در پروژه مورد مطالعه ایستگاه‌های نشست سنجی زیر سطحی در خیابان و روی تونل به صورت سه و پنج نقطه‌ای به ترتیب که یک نقطه در محور تونل و نقاط دیگر هر یک در محدوده ۵ الی ۷/۵ متری اطراف آن نصب می‌شوند. در شکل ۲-۲ یک ایستگاه ۵ نقطه‌ای نشست سنج نشان داده شده است (شرکت مهندسی تونل راد، ۱۳۸۹).



شکل ۲-۲- ایستگاه نشست سطحی همراه گل میخ‌ها (شرکت مهندسی تونل راد، ۱۳۸۹)

ایستگاه‌های نشست سنجی در محل ایستگاه‌های تقارب سنجی و در خیابان نصب شده‌اند. نکته قابل توجه در ایستگاه‌های نشست سطحی عبور از لایه ضخیم آسفالت و زیرسازی خیابان و اندازه‌گیری نشست زمین طبیعی محدود تونل می‌باشد. می‌توان با یک برنامه زمانی مناسب قرائت و نصب، که قبل و بعد از احداث فضای زیرزمینی انجام می‌گیرد، دید نسبتاً جامعی از میزان نشست زمین در اثر عبور فضای زیرزمینی به دست آورد، بدین صورت که در جلوتر از جبهه کار پیشروی پین‌ها نصب گردند. بنابراین وضعیت زمین دست نخورده اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد، با پیشروی تونل و نزدیک شدن آن به پین‌های یاد شده تأثیر احداث تونل در جلوی خود و همین‌طور با گذشت تونل از موقعیت یاد شده، تغییرات رخ داده در سطح زمین و لایه‌های زیر سطحی، ثبت خواهد گشت و می‌توان مقایسه کاملی از نشست انجام داد. با اندازه‌گیری‌های مرتب و دوره‌ای، خطرات احتمالی و نیز تاثیرات گذشت زمان بر روی لایه‌ها مشخص خواهد گشت. قرائت به‌وسیله یک دوربین با دقت مناسب (حدود ۰/۱ میلیمتر) به صورت دوره‌ای انجام می‌گیرد و در صورت مشاهده اختلاف در تراز قرائت شده مربوط به پین‌ها می‌توان به نشست یا بالازدگی لایه‌ها پی‌برد (خسروتاش، ۱۳۸۶).

آرایش پین‌ها در سطح زمین بالای تونل در پروژه مورد مطالعه به این صورت است که در هر ۵۰ متر یک ایستگاه اندازه‌گیری شامل یک تا سه عدد پین نصب گردیده است. در شکل ۲-۳ یک پین نشست سنج که در آسفالت قرار داده شده است مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳- پین نشست سنج نصب شده در سطح خیابان (شرکت تونل راد، ۱۳۸۹)

۲-۲- تحلیل برگشتی

۲-۲-۱- مقدمه

طراحی سازه در سنگ و خاک به دو طریق انجام می‌گیرد که در عملکرد باهم تفاوت دارند. در روش اول اطلاعات تجربی به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه به عنوان ویژگی‌های مکانیکی سنگ یا خاک در نظر گرفته می‌شود و سپس بر اساس این اطلاعات شروع به ساختن سازه می‌کنند، این روش از نظر زمانی برای به دست آوردن پارامترهای مکانیکی سنگ و یا خاک دارای محدودیت می‌باشد. در این روش فرض می‌شود که بعد از طراحی، سنگ همان رفتاری را که در آزمایش‌ها نشان داده، از خود بروز می‌دهد و رفتار سنگ یا خاک منطبق بر همان چیزی است که در طرح آمده است و اگر هم تفاوتی در نوع رفتار موجود در حین ساخت سازه با رفتار سنگ در طراحی دیده شد، تغییری در طرح داده نمی‌شود. به این نوع طرح ریزی، طراحی صلب می‌گویند. در این روش هیچ هم‌فکری بین اجرا کننده قرارداد و مشاور و طراح پروژه وجود ندارد. با توجه به محدود بودن اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های برجا و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه ممکن است در حین انجام پروژه مشکلات پیش‌بینی نشده‌ای به وجود بیاید. برای جلوگیری از این مسئله طراحان ممکن است راه‌حلهایی درپیش بگیرند که می‌تواند به روش‌های زیر دسته‌بندی شوند (Sakurai, 1983):

۱- یک ضریب اطمینان بالا در نظر بگیرند.

۲- شرایط فرضی را در طرح خود اضافه کنند که مشکلات احتمالی به وجود آمده در حین کار را در نظر گرفته باشد.

روش اول باعث می‌شود که طرح از نظر اقتصادی دچار مشکل شود و روش دوم نیز غیر مطمئن می‌باشد.

پس برای حل این مسائل باید چه اقدامی را در نظر گرفت؟ در حقیقت جزئیات زمین‌شناسی به

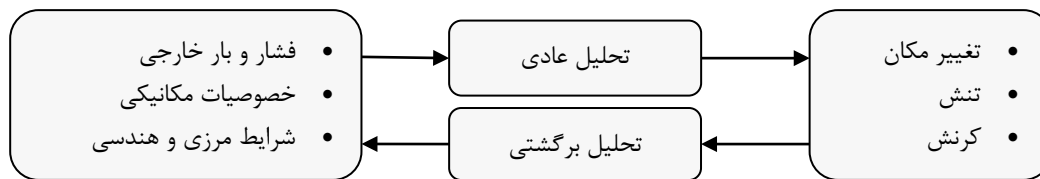
راحتی می‌توانند روی رفتار سنگی که نوع رفتار آن پیش بینی شده بود تاثیر بگذارند و رفتار آن را به سویی متفاوت از آن چیزی که انتظار می‌رود هدایت کند. برای جلوگیری از مواردی که گفته شد، روشی توسط ترزاقی و پک^۱ (۱۹۴۸) معرفی گردید. این راه حل به روش‌های مشاهده‌ای معروف گردید که در کارهای عظیم ژئوتکنیک و ساخت سدها و تونل‌ها به کار برده می‌شود. این روش نیاز به همکاری نزدیک مشاور و اجرا کننده طرح دارد و باید سیستم اندازه‌گیری در سازه برپا گردد. حال می‌توان با توجه به نصب این دستگاه‌ها، رفتار سنگ یا خاک را در حین ساخت سازه و بعد از آن مشاهده کرد. می‌توان اطلاعات به دست آورده شده در حین ساخت را با داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه کرد و هر نوع تفاوتی بین آن‌ها را تشخیص داد و پارامترهای مربوط به سنگ یا خاک را با توجه به این اختلافات تصحیح کرد. این امر باعث می‌شود که اندازه‌گیری و برداشت جدیدی از سنگ و یا خاک به دست بیاید. این نوع روش طراحی را روش انعطاف‌پذیر می‌نامند.

۲-۲-۲- تحلیل برگشتی و تحلیل معمولی

تحلیل برگشتی معمولاً به عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل کننده یک سیستم را از تحلیل رفتار خروجی آن سیستم تعیین کند. در مسائل تحلیل برگشتی مربوط به مکانیک سنگ، شرایط فشارها مانند بارهای خارجی و خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها مثل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، از روی جابه‌جایی‌ها، کرنش‌ها و فشارهای اندازه‌گیری شده در طول اجرای پروژه و پس از آن محاسبه می‌شوند (Hudson, 1992).

این روند محاسبات در حقیقت عکس روند تحلیل معمولی است، زیرا در تحلیل معمولی شرایط تنش و خصوصیات مکانیکی محیط جزء داده‌های ورودی برای محاسبه جابه‌جایی و تنش به شمار می‌روند، به همین دلیل این تحلیل را برگشتی می‌نامند (بید گلی، ۱۳۸۳). ارتباط بین تحلیل معمولی و برگشتی در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است.

¹ -Terzaghi and Pek

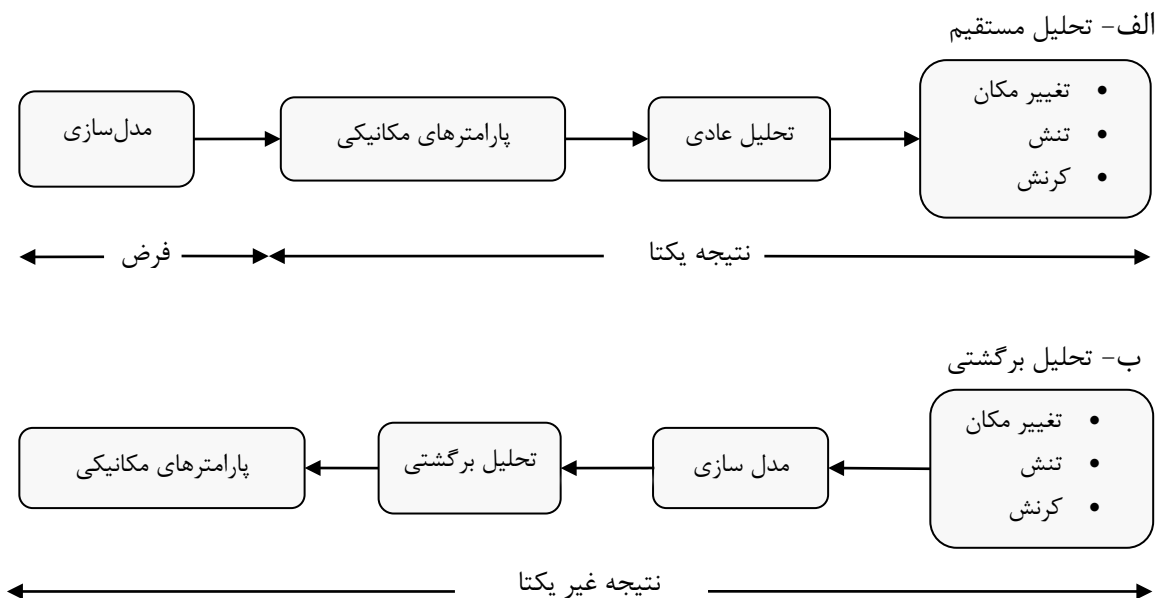


شکل ۲-۴- ارتباط تحلیل معمولی و برگشتی (Sakurai S., 1993)

باید تاکید کرد که تحلیل برگشتی روند ساده‌ی عکس تحلیل معمولی نیست، زیرا به خصوص در مورد مدل کردن سنگ‌ها فرضیات پایه ممکن است متفاوت باشند. این امر به خصوص در مدل‌سازی می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. در تحلیل معمولی یک مدل مکانیکی معمولاً به طریقی که بتواند نماینده رفتار سنگ باشد (مثلاً الاستیک، الاستوپلاستیک، ویسکوپلاستیک و...) ساخته می‌شود. وقتی این مدل ساخته شد، مقادیر ثابت‌های مکانیکی مدل را می‌توان از آزمایش‌های آزمایشگاهی و یا برجا تعیین کرد. این مقادیر به عنوان اطلاعات ورودی تحلیل معمولی برای محاسبه مقادیر جابه‌جایی، تنش و کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید توجه کرد که این روش منجر به تعیین جواب یگانه‌ای برای مدل فرض شده، خواهد شد. از طرفی دیگر در تحلیل برگشتی، جابه‌جایی‌ها، کرنش‌ها و مقادیر فشار ابتدا از اندازه‌گیری برجا به دست می‌آیند و سپس یک مدل مکانیکی برای محیط فرض می‌شود. ثابت‌های مکانیکی مدل و نیروهای خارجی از روی مقادیر قرائت‌های صحرائی و به صورت برگشتی تعیین می‌شود. دیده می‌شود که مقادیر به دست آمده در این روش بستگی شدیدی به مدل فرض شده برای محیط دارد. به طور مثال اگر یک مدل الاستیک برای رفتار محیط حفاری در نظر گرفته شود، مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون محاسبه خواهند شد در صورتی که مدل الاستوپلاستیک فرض شده باشد، علاوه بر این دو، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ نیز محاسبه خواهند شد. بنابراین دیده می‌شود که با در نظر گرفتن مدل‌های متفاوت و به ازای مقادیر ورودی یکسان، نتایج مختلفی به دست خواهد آمد (Sakurai, 1993).

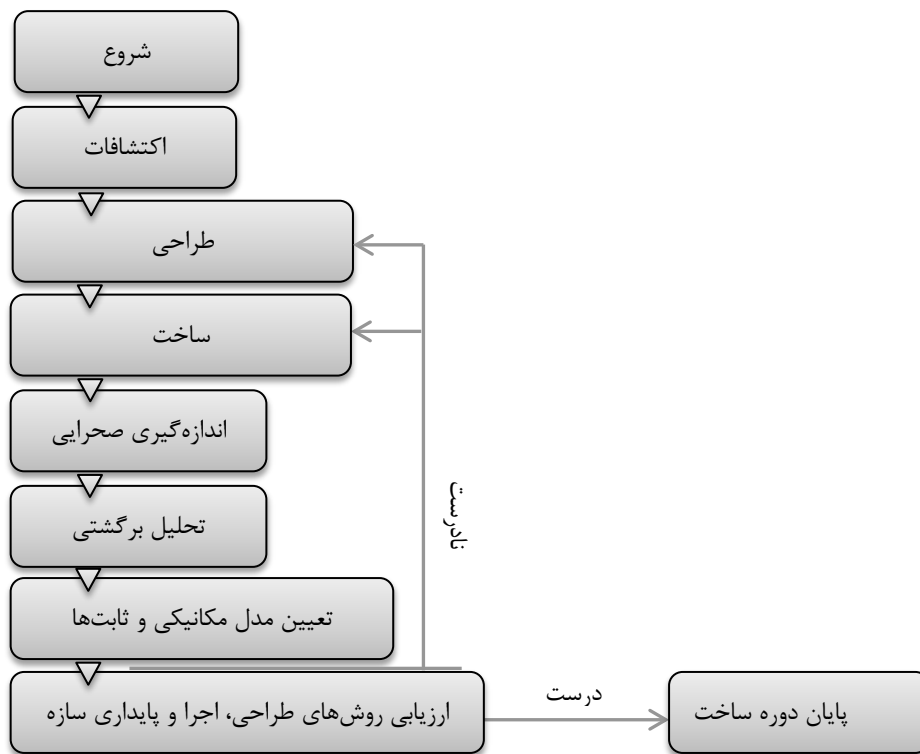
تفاوت بین تحلیل برگشتی و معمولی در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که در تحلیل معمولی، به دست آمدن نتایج واحد حتمی است و این حتی در حالتی که رفتار

واقعی سنگ و مدل یکسان نیستند نیز اتفاق خواهد افتاد، اما در مورد تحلیل برگشتی واحد بودن نتایج حتمی نیست و این به آن علت است که مدل پس از جمع آوری اطلاعات ورودی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۵- مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی (Sakurai, 1993)

برای به دست آوردن نتایج واحد از یک تحلیل برگشتی باید دقت زیادی اعمال شود تا مدل انتخاب شده نماینده رفتار واقعی محیط باشد. بنابراین مدل‌سازی در تحلیل برگشتی از اهمیت بیشتری نسبت به تحلیل معمولی برخوردار خواهد بود. باید تاکید کرد که در صورت امکان نباید یک مدل ثابت را برای محیط در نظر گرفت، بلکه باید مدل را نیز به صورت برگشتی از اطلاعات اندازه‌گیری شده برجا به دست آورد. هدف نهایی تحلیل برگشتی کمک به روش طراحی و ساخت همزمان در طی دوران اجرای یک سازه است. مراحل بررسی پایداری یک ساختار و مناسب بودن روش‌های طراحی و اجراء در شکل ۲-۶ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن بحث بالا درباره ارتباط بین تحلیل برگشتی، اندازه‌گیری‌های برجا و روش طراحی و اجرای هم‌زمان پروژه به راحتی قابل مشاهده است که آنالیز برگشتی باید در کنار فرایند اجرا انجام گیرد. با این دیدگاه، تحلیل برگشتی با تحلیل معمولی که قبل از فاز اجرای پروژه انجام می‌شود متفاوت است (Sakurai, 1993).



شکل ۲-۶- مراحل طراحی و اجرا یک ساختار در روش مشاهده‌ای (Sakurai, 1993)

۲-۲-۳- سابقه علمی تحلیل برگشتی

آغاز استفاده از روش تحلیل برگشتی^۱ در مسائل مختلف مهندسی سنگ و خاک را می‌توان از دهه ۱۹۷۰ دانست. کاواناگ^۲ (۱۹۷۳) یک فرمول نویسی برگشتی بر اساس اجزاء محدود پیشنهاد کرد که با استفاده از جابه‌جایی و کرنش اندازه‌گیری شده، امکان محاسبه ثابت‌های مواد را برای هر نوع ماده اعم از همگن، همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد فراهم می‌سازد. مشکل عمده روش از آن جا ناشی می‌شود که جابه‌جایی‌ها و کرنشی‌های اندازه‌گیری شده دارای پراکندگی باشند، در این صورت روش هرگز همگرا نمی‌شود.

گیدا^۳ (۱۹۷۵) شکل اصلاح شده‌ای از الگوریتم کاواناگ را پیشنهاد نمود که در آن با استفاده از تراکم الاستیک و روش حداقل مربعات، می‌توان مدول حجمی و برشی را به صورت برگشتی محاسبه

^۱ - Back analysis

^۲ - Kavanagh

^۳ - Giada

نمود. در این الگوریتم برای به دست آوردن ثابت‌های مواد نیز اندازه‌گیری جابه‌جایی به تنهایی کافی است. با این وجود برای شناسایی شرایط بارگذاری به همراه ثابت‌های مواد علاوه بر جابه‌جایی، اندازه‌گیری مقادیر بارگذاری و فشار نیز ضروری خواهد بود. به همین منظور یک روش عمومی و منحصر به فرد برای محاسبه بازگشتی پارامترهای بارگذاری توسط گیدا و جورینا^۱ فرمول نویسی و ارائه شد.

تاکوچی^۲ و ساکورایی^۳ (۱۹۷۷) یک الگوریتم تحلیل برگشتی را بر اساس روش برگشتی فرمول‌بندی نمودند. این روابط با استناد به داده‌های حاصل از تعداد معدودی اندازه‌گیری جابه‌جایی، با فرض موادی همگن و دارای رفتار الاستیک خطی قادر به تعیین توزیع کرنشی در اطراف تونل می‌باشد.

در سال ۱۹۷۹، ساکورایی و آبه^۴ یک روش طراحی را برای تعیین ابعاد بازکننده‌های زیرزمینی که بر پایه جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در جریان حفاری پایلوت و تونل‌های آزمایشی حفر می‌شوند، ارائه نمودند (Gioda, 1986).

سیویدینی^۵ و همکارانش در سال ۱۹۸۱، روش‌هایی را برای تحلیل برگشتی بر اساس فرمول‌بندی برگشتی و مستقیم ارائه دادند و این طور نتیجه‌گیری نمودند که روش مستقیم بر حداقل کردن توابع خطا استوار است و ممکن است روشی قابل ترجیح باشد. آن‌ها همچنین در سال ۱۹۸۵ اعلام کردند که با اندازه‌گیری همگرایی در مراحل مختلف احداث فضاهای زیرزمینی و نیز به کمک روش مستقیم می‌توان ثابت‌های تابع زمان مواد را تعیین کرد (Shang, 2002).

در ۱۹۸۹، یانگ و استرلینگ^۶ با استفاده از روش‌های المان مرزی یک روش تحلیل برگشتی

¹ - Jurina

² - Takeuchi

³ - Sakurai

⁴ - Abe

⁵ - Cividini

⁶ - Young and Sterling

منحصر به فرد برای تعیین تنش‌های برجا و خواص الاستیک توده‌سنگ پیشنهاد نمودند. تحلیل برگشتی تنش‌های برجا در یک ماده با رفتار غیر خطی نیز توسط ژانگ^۱ و همکارانش فرمول‌بندی شده است.

ساکورایی و همکارانش در سال ۱۹۹۸ مدل رفتاری کلی توده‌سنگ که برگرفته از آزمایش‌های برجا بود، را مطرح کردند. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۰۳ مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف تحلیل برگشتی با روش‌های موجود انجام داده و روش‌های مفید که از درجه اعتبار و دقت کافی در تحلیل برگشتی برخوردارند، را پیشنهاد نمودند. از جمله این روش‌ها که لی و هائو (۲۰۰۲) نیز آن را مطرح کردند، استفاده از تحلیل برگشتی هوشمند در تخمین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ است (شکرزاده، ۱۳۸۲).

۲-۲-۴- انواع روش‌های تحلیل برگشتی

در فرآیند مهندسی، با دو گروه از انتخاب‌ها مواجه هستیم، گروه اول مربوط به روش‌های مدل‌سازی و گروه دوم مربوط به مقادیر عددی داده‌های ورودی می‌باشد. با این که انتخاب‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی کاملاً وابسته به تجربه و قضاوت مهندسی هستند، ولی انتخاب پارامترهای ورودی کاملاً بستگی به اطلاعات موجود از سیستم حقیقی دارد. در برخی موارد این اطلاعات ضعیف‌تر از آن هستند که بتوان داده‌های ورودی را به طور کامل و دقیق تعیین نمود. برای غلبه بر این مشکل می‌توان از اندازه‌گیری‌های صحرایی در طی مراحل اولیه ساخت با استفاده از تحلیل برگشتی استفاده کرد. روش‌های گوناگونی جهت تحلیل برگشتی در مهندسی سنگ و خاک توسعه یافته که از مسائل الاستیک ساده تا مسائل پیچیده غیر خطی را شامل می‌شود (قدیری، ۱۳۸۹). به طور کلی روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته معکوس^۲ و مستقیم^۳ تقسیم بندی نمود.

¹ - Zhang

² - Inverse Approach

³ - Direct Approach

۲-۲-۴-۱- تحلیل برگشتی معکوس

در تحلیل برگشتی معکوس نیازی به فرمول‌بندی تحلیل تنش به حالت عکس وجود ندارد، بلکه معادلات حاکم بر مساله تحلیل تنش عکس می‌شوند تا کمیت‌های مجهول در آن که همان اندازه‌گیری‌های موجود هستند به صورت داده‌های ورودی ظاهر گردند و در مقابل، مقادیری که در تحلیل تنش، معلوم در نظر گرفته می‌شوند، مثل مدول الاستیسیته به صورت گروه مجهولات ظاهر شوند. باید توجه داشت که تعداد سنجش‌های برجا باید بیشتر از تعداد پارامترهای مجهول باشد تا این که در دستگاه معادلات، تعداد مجهولات کمتر از تعداد معادلات شوند. لیکن مشکل عمده در روش معکوس، دستیابی به یک راه حل پایدار از لحاظ عددی برای مقادیر شدیداً پراکنده اندازه‌گیری شده (که در مسائل مهندسی سنگ و خاک امری عادی است) می‌باشد. همچنین در صورت به کارگیری این روش در مسائل غیرخطی مشکلاتی بروز می‌نماید (Akutagawa, 2003).

این روش به دلیل عدم نیاز به تکرار و در نتیجه کاهش زمان محاسبه، در کاربردهای مهندسی جایگاه ویژه‌ای پیدا نموده است. از آن جایی که روش‌های این گروه نیازمند معکوس نمودن معادلات حاکم بر مسئله تحلیل تنش می‌باشند، می‌بایستی روش‌های متفاوتی را برای مسائل مختلف تحلیل برگشتی با درجه بندی به کار برد، چرا که شیوه حل این روش‌ها بستگی به خصوصیات به کار رفته در روش مدل‌سازی و پارامترهایی که باید به طور برگشتی محاسبه شوند، دارند (Zhifa, 2000).

الف) تحلیل برگشتی ثابت‌های الاستیک مبتنی بر اجزاء محدود: این روش مبتنی بر روش اجزاء محدود پیشنهادی کواناگ برای تحلیل برگشتی مدول الاستیک است و از الگوریتم حداقل مربعات برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای مجهول استفاده می‌کند. با داشتن جابه‌جایی و معادلات و منحنی‌های به دست آمده می‌توان ماتریس سختی و سپس مدول بالک را محاسبه کرد.

ب) تعیین خواص مکانیکی توده‌های سنگی درزه دار با آنالیز برگشتی: اساس این روش که توسط

تسوشیاما^۱ ارائه شده است، مطابق تئوری مکانیک شکست می‌باشد. در این روش ابتدا تانسور شکست برای توده سنگ درزه‌دار تعیین می‌شود. این روش، رفتار سنگ را الاستیک خطی و محیط را ایزوتروپ فرض می‌کند. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون معلوم فرض می‌شود. این روش برای توده‌سنگ‌های درزه دار مناسب می‌باشد و با آنالیز برگشتی جابه‌جائی‌ها و بارهای اندازه‌گیری شده، خواص مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار به دست می‌آید. این روش مناسب فضاهائی است که در چند مرحله حفر می‌شوند. می‌توان جابه‌جائی‌ها و عکس‌العمل توده‌سنگ را در مراحل بعدی پیش بینی نمود (Kaisar, 1998).

ج) تعیین مقاومت توده‌سنگ و شعاع ناحیه پلاستیک با استفاده از داده‌های همگرائی: با توجه به این که اگر سنگ حالت الاستیک داشته باشد همگرائی در فاصله ۲ یا ۳ برابر قطر فضای زیر زمینی، از سینه کار منظور می‌شود و اگر رفتار سنگ پلاستیک باشد این فاصله ۳ تا ۱۰ برابر قطر فضای زیر زمینی افزایش می‌یابد، با استفاده از داده‌های همگرائی سنج، منحنی‌های جابه‌جایی بر حسب فاصله از سینه کار رسم می‌شود (Tanimoto & Fujiwara, 1998). با استفاده از این منحنی می‌توان شعاع ناحیه پلاستیک را با تقریب خوبی به دست آورد. همچنین با معلوم بودن مقاومت فشاری تک محوری سنگ و زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت نهائی توده‌سنگ با استفاده از معیار هوک و براون قابل ارزیابی است. در نتیجه در این روش داده‌های ورودی، همگرایی اندازه‌گیری شده، مقاومت فشاری تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی سنگ بوده و هدف به دست آوردن شعاع ناحیه پلاستیک، مقاومت نهائی توده‌سنگ در نقطه شکست و بار وارد شده به سیستم نگهدارنده می‌باشد.

تحلیل برگشتی تنش‌های اولیه مبتنی بر اجزاء محدود (Sakurai, 1993)، تحلیل برگشتی فشار زمین^۲ (قدیری، ۱۳۸۹)، تعیین چگونگی توزیع فشار روی سیستم نگهداری فضای زیرزمینی با استفاده از تحلیل برگشتی (Gioda, 1985) و آنالیز برگشتی الاستیک برای تعیین مدول الاستیک و بارهای

¹-Tsuchiyama

²- Eearth Pressure

ناشی از حفاری که توسط هیستاکا¹ ارائه شده است (Hisatake, 1986)، نیز جزء روش‌های تحلیل برگشتی معکوس هستند.

۲-۲-۴-۲- تحلیل برگشتی مستقیم

فرمول‌بندی به کار رفته در روش مستقیم همانند تحلیل تنش عادی است. اساس روش مستقیم بر مبنای بهینه‌سازی با استفاده از تکرار استوار است. در این حالت مسئله تحلیل معکوس با استفاده از رابطه کمینه‌سازی طوری حل می‌شود که مقادیر آزمایشی پارامترهای مجهول در الگوریتم تحلیل تنش، منجر به حداقل شدن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، می‌شود.

مزایای این روش عبارتند از (Sigh, Bhawani, Goel, Rajnish, 2006):

- آن را می‌توان بدون نیاز به اطلاع از ریاضیات پیچیده برای مسائل غیر خطی به کار برد.
 - الگوریتم‌های استاندارد برنامه‌سازی مانند Simplex و Rosenbrock برای آن قابل کاربرد است.
 - قابلیت استفاده سریع از آن برای زمانی که با داده‌های فراوانی سرو کار داریم فراهم می‌آورد.
- الف) روش سیمپلکس^۲ (چند ضلعی انعطاف پذیر): یک چند ضلعی در فضای n بعدی از پارامترهایی که بایستی ارزیابی شوند (متغیرهای آزاد)، مجموعه‌ای از $n+1$ نقطه یا رأس است. به طوری که n بردار از یک نقطه به نقاط دیگر مستقل خطی باشند. با انتخاب یک چند ضلعی یعنی $n+1$ مجموعه از پارامترهای آزمایشی مناسب، تابع خطا در هر رأس تعیین می‌شود. رأسی که دارای بیشترین خطا است توسط مرکز رئوس دیگر منعکس می‌شود. اگر خطای مربوط به رأس انعکاس یافته نسبت به خطای سایر رئوس کوچک باشد، رأس خطای حداکثر توسط رأس انعکاس یافته جایگزین می‌شود و فرآیند با این جایگزینی ادامه می‌یابد. در غیر این صورت آزمایش‌های دیگری انجام می‌گردد که یا به کاهش خطای میانگین چند ضلعی منجر شود و یا فرآیند حداقل نمودن قطع گردد (اعصاری

¹-Hisatake

²-Simplex Approach

م، ۱۳۸۴).

ب) الگوریتم روزنبرک^۱: این روش در رده روش‌های جستجوی مستقیم قرار می‌گیرد. ساده ترین روند از این نوع، شامل اجرای حداقل نمودن تابع خطا نسبت به هر متغیر است که طی آن متغیرهای باقی‌مانده ثابت نگه داشته می‌شوند. این روش‌ها تنها زمانی کارآمد است که برهم کنش اندکی بین متغیرها وجود داشته باشد. تابع خطا تقریباً به موازات یک محور، گودی نشان می‌دهد. این امر مبنای روش روزنبرک را مشخص می‌کند، که در آن کاهش خطا بر اساس حرکت در راستای محوری قابل تغییر، انجام می‌گیرد و در هر گام سعی می‌شود جهت کلی فرورفتگی به دست آمده و اولین محور در گام بعدی در این راستا انتخاب شوند (Gioda, 1985).

ج) روش پاول^۲: این شیوه روشی جدیدتر و پیشرفته‌تر است که در حالت جستجوی مستقیم از مزایای عملی روش ترکیب گرادیان بهره می‌برد. هنگامی که یک نقطه در فضای متغیرهای آزاد از محدوده‌ای فراتر می‌رود، تابع خطا مقدار بزرگی را به خود می‌گیرد و در نتیجه روش حداقل سازی به طور خودکار به مسیر بهینه در ناحیه محتمل باز می‌گردد (Gioda, 1985).

د) تحلیل برگشتی مستقیم با به کارگیری روش بهینه‌سازی: یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای تحلیل برگشتی روش جستجوی مستقیم می‌باشد. روش جستجو مستقیم، روش بهینه‌سازی بدون محدودیت می‌باشد (Joen, Yang, 2004).

از میان روش‌های بهینه‌سازی موجود که در روش جستجو مستقیم به کار می‌رود روش تک متغیره، تک متغیره جایگزین و روش جستجوی الگویی می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردیده است، روش تک متغیره و روش تک متغیره جایگزین مقدار پارامترهای طراحی (خصوصیات مکانیکی سنگ محیط) را صرف نظر از مقدار اولیه آن‌ها به طرز موفقیت‌آمیزی جستجو می‌نمایند، در حالی که روش جستجوی الگویی در بعضی موارد با شکست مواجه می‌شود (Joen, Yang, 2004).

¹-Rosenbrock

²-Powell

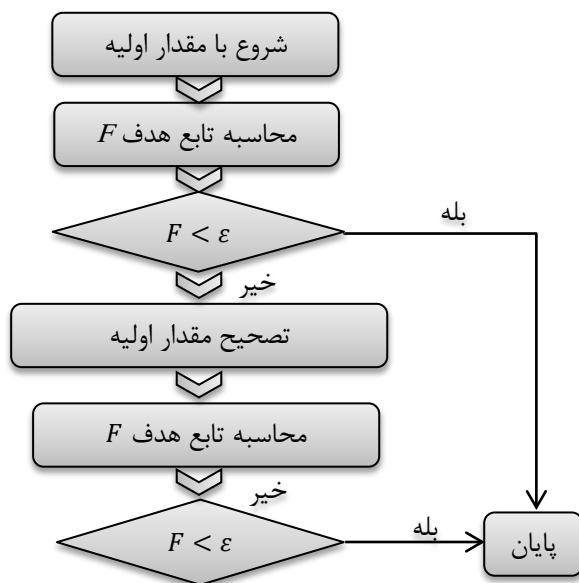
روش بهینه‌سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطای زیر که به نام تابع هدف نامیده می‌شود استوار است.

$$\text{Error} = \frac{\sum_{i=1}^N [u_i - u_i^*]^2}{\sum_{i=1}^N u_i^*} \quad (1-2)$$

در معادله (۱-۲) u_i و u_i^* به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در نقطه i می‌باشند. N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده می‌باشد. شکل ۲-۷ طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار را نمایش می‌دهد. مقدار اولیه که برای پارامتر مجهول X_i به کار می‌رود، مقداری است که معمولاً برای تحلیل معمولی به کار می‌رود. در صورتی که تابع هدف به حد مجاز همگرا شود، گام تکرار متوقف خواهد شد و در غیر این صورت بعد از اصلاح پارامترها توسط روش بهینه، گام تکرار تا همگرایی شرط مذکور ادامه خواهد یافت. یانگ و جئون با مطالعات خود در این زمینه تابع برگشتی برای محاسبه مقدار جدید X_i ، به صورت معادله (۲-۲) ارائه نمودند.

$$X_{i+1} = X_i + \lambda_i^* \cdot S_i \quad (2-2)$$

در معادله فوق λ_i^* فاصله گام و S_i امتداد جستجو می‌باشد. فاصله گام به صورت نسبت کمیت محاسبه شده به اندازه‌گیری شده و امتداد جستجو نیز مطابق با روش استفاده شده تعریف می‌گردد.



شکل ۲-۷- طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار (Joen, Yang, 2004).

۲-۲-۴-۳- تحلیل برگشتی هوشمند^۱

همان طور که گفته شد، در روش‌های مختلف تحلیل برگشتی مستقیم، هدف نهایی تنظیم مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) است، به نحوی که مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی‌ها)، مطابقت قابل قبولی با جابه‌جایی‌های ثبت شده در رفتار سنجی داشته باشند.

از سال ۱۹۹۱ با کارهایی که لی و هائو در زمینه هوش مصنوعی انجام دادند، تحلیل برگشتی هوشمند به وجود آمد (Li, Shihui, et al, 2002). دو فرایند اصلی در تحلیل برگشتی مستقیم عبارتند از در نظر گرفتن پارامترهای ژئومکانیکی برای محیط مورد نظر و محاسبه مقدار جابه‌جایی‌های متناظر با آن‌ها. در روش‌های معمول تحلیل برگشتی مستقیم، عموماً از نرم افزارهای طراحی شده بر مبنای روش‌های عددی و یا مستقیماً از معادلات روش‌های عددی، برای محاسبه مقدار جابه‌جایی‌های متناظر با پارامترهای ژئومکانیکی در نظر گرفته شده برای محیط مورد نظر استفاده می‌شود. روش‌های مورد استفاده برای در نظر گرفتن پارامترهای ژئومکانیکی برای محیط مورد نظر و بهینه‌سازی آن‌ها نیز در مباحث قبلی مورد بررسی قرار گرفتند.

در تحلیل برگشتی هوشمند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی به دلیل سرعت و دقت بالا جایگزین روش‌های بهینه‌سازی رایج برای تحلیل برگشتی مستقیم شده‌اند. با توجه به نحوه عملکرد الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی تابع هدف و لزوم محاسبه لحظه به لحظه تابع هدف، استفاده از نرم افزارهای طراحی شده بر مبنای روش‌های عددی در این روش‌ها غیرممکن می‌باشد. بنابراین مقدار تابع هدف مستقیماً توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی محاسبه می‌شود (Miranda, Dias, Eclaircy-Caudron, Correia, Costa, 2011. Shang, Cai, Hao, Wu, Li, 2002. Li, Yang, Hao, (Shang, 2006).

خلاصه‌ای از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه مستقیم تابع هدف توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی برای تحلیل برگشتی در جدول ۲-۲ آورده شده است.

¹-Intelligent Back Analysis

جدول ۲-۲- چند مورد از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه مستقیم تابع هدف توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی برای تحلیل برگشتی

موضوع	پارامتر خروجی	ارائه دهنده و سال ارائه
	تحلیل برگشتی	
تحلیل برگشتی هوشمند جابه‌جایی‌ها برای تونل‌سازی	E, K_0	Shang, Cai, Hao, Wu, Li, 2002
تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی به وسیله بهینه‌سازی مدل ۳ بعدی یک سازه زیرزمینی	E, K_0	Miranda, Dias, Eclaircy-Caudron, Correia, Costa, 2011
تحلیل برگشتی هوشمند جابه‌جایی‌های ثابت شده در تونل‌سازی	E, λ	Shang, Cai, Hao, Wu, Li, 2002

با توجه به دشوار و تخصصی بودن محاسبه مقدار تابع هدف مستقیماً توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی، اخیراً در روش‌های تحلیل برگشتی هوشمند سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی جایگزین محاسبه مستقیم تابع هدف توسط معادلات حاکم بر روش‌های عددی شده‌اند. برای آموزش سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی از زوج داده‌های تولید شده توسط نرم افزارهای عددی با توجه به اطلاعات جمع آوری شده در منطقه مورد بررسی، استفاده می‌شود. سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی بعد از یافتن رابطه غیر خطی موجود بین مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی‌ها)، می‌توانند لحظه به لحظه تابع هدف را محاسبه نموده و مقادیر حاصل را برای بهینه‌سازی تابع هدف در اختیار الگوریتم‌های تکاملی قرار دهند (Zhao, Yin, 2009. Lee, Akutagawa, Yokota, 2008. Yu, Zhang, Yuan, 2007. Yang, Wu,) (Hon, 2010. Jiang, Wang, Tang, 2011. Wang, Li, Shen, 2007).

خلاصه‌ای از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه تابع هدف توسط سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی برای تحلیل برگشتی در جدول ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۲-۳- چند مورد از کاربرد الگوریتم‌های تکاملی همراه با محاسبه تابع هدف توسط سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی برای تحلیل برگشتی

موضوع	پارامتر خروجی	ارائه دهنده و سال ارائه
	تحلیل برگشتی	
تحلیل برگشتی رفتار خطی و غیر خطی خاک تونل‌های کم عمق با شبکه‌های عصبی	E, K ₀	Lee, Akutagawa, Yokota, 2008
اصلاح پارامترهای خاک برای محاسبه نشست سد خاکی با شبکه‌های عصبی	E, G	Wang, Li, Shen, 2007
تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توسط PSO و SVM	E, K ₀	Zhao, Yin, 2009

لازمه استفاده از روش تحلیل برگشتی هوشمند وجود داده‌های بسیاری از مکان‌های مختلف منطقه مورد نظر است. در صورتی که این ابزار فراهم گردد، در آن صورت طبق نظر شیپویی لی که این روش را با سایر روش‌های تحلیلی برگشتی مقایسه نموده، به مزیت‌های این روش به صورت زیر می‌توان اشاره کرد (Li, Shihui, et al, 2006):

- استفاده سریع و هوشمند
- قابل اعتماد
- قابل استفاده در مدت دوره رفتار سنجی

۲-۳- نتیجه‌گیری

تحلیل برگشتی برای حل مسایل مرتبط با رفتارنگاری به صورت مستقیم و معکوس به‌وجود آمده است. در بسیاری از موارد به‌علت محدودیت در ارتباط با حل مسائل، از تحلیل برگشتی مستقیم استفاده می‌شود. ویژگی تحلیل برگشتی مستقیم در این است که نیاز به فرمول‌بندی پیچیده ندارد، اما بهینه‌سازی تابع هدف مستلزم تصحیح متعدد پارامترها است که تصحیح هر یک نیاز به حداقل یک محاسبه دارد. بنابراین حل عددی به خصوص برای مدل‌های بزرگ، زمان‌گیر است. تحلیل برگشتی هوشمند روشی است برای تعیین رابطه غیر خطی موجود بین مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جاب‌جایی‌ها) توسط سیستم‌های هوشمند که

بدین منظور از اطلاعات جمع آوری شده در منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود. سپس از رابطه غیر خطی حاصل، برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی معادل با جابه‌جایی‌های ثابت شده در رفتار سنجی استفاده می‌شود.

در فصل چهارم با استفاده از تحلیل برگشتی هوشمند، پارامترهای اصلی طراحی که توسط آنالیز حساسیت به دست آمده‌اند، محاسبه می‌شوند.

فصل سوم

مفاهیم سیستم‌های فازی و طراحی آن‌ها با استفاده

از زوج داده‌های ورودی-خروجی

۳-۱-۱- مقدمه

اصول منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط دکتر لطفی‌زاده برای از بین بردن محدودیت‌های مجموعه‌های کلاسیک ارائه شد. مجموعه‌های کلاسیک از منطق غیرمنعطف تبعیت می‌کنند. در این مجموعه‌ها یک مقدار یا به مجموعه تعلق دارد یا ندارد و حالت سومی فرض نمی‌شود. این نوع مجموعه‌ها در کار با مسائل علمی و کاربردهای صنعتی ناتوان هستند و قابلیت پایینی دارند. در منطق فازی مفهوم عضویت دارای تعریفی متفاوت است. به عبارتی می‌توان گفت عضویت تعریفی بخشی دارد (Zadeh, 1965).

یک مجموعه کلاسیک C در دیدگاه ریاضی به شکل رابطه (۳-۱) تعریف می‌شود.

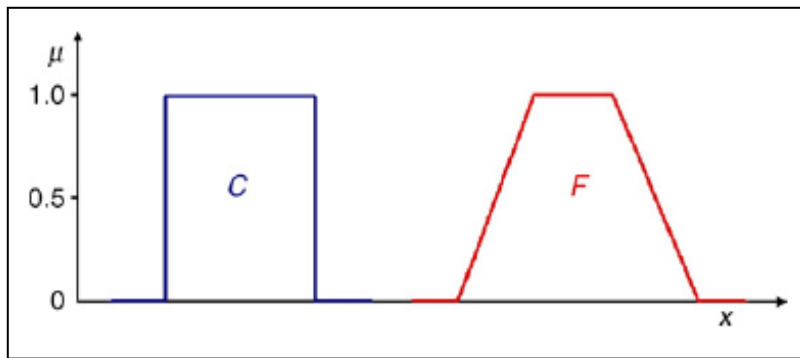
$$\mu_C(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in C \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳-۱)$$

دکتر لطفی‌زاده در تعریف تئوری فازی این مجموعه را به صورت رابطه (۳-۲) گسترش داده است.

$$\mu_F(x): X \rightarrow [0,1] \quad (۳-۲)$$

که μ در روابط فوق بیان‌گر میزان عضویت در مجموعه مورد نظر می‌باشد.

بنا به تعریف فازی، X عضوی از بازه $[0,1]$ است و می‌تواند هر مقدار بین این دو عدد را داشته باشد (Yagar and Zadeh, 1992). شکل ۳-۱ تعریف عضویت در مجموعه کلاسیک و فازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- تعریف عضویت در مجموعه کلاسیک و فازی (قیاسی فریز، ۱۳۸۹)

در یک مجموعه فازی، تابع عضویت مشخص کننده میزان عضویت یک عضو در مجموعه است.

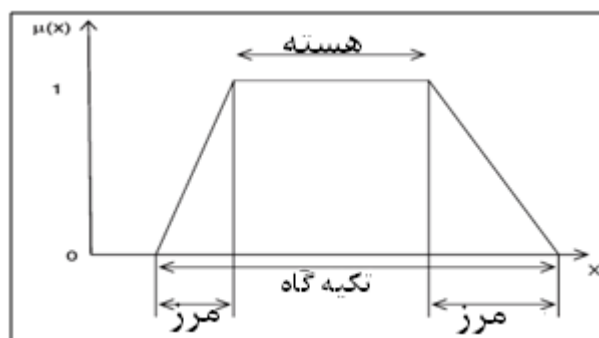
هر تابع عضویت از سه بخش اصلی بوجود می‌آید (Siavanandam, et al, 2007).

- هسته^۱

- تکیه‌گاه^۲

- مرز^۳

در شکل ۳-۲ این سه بخش نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۲- قسمت‌های اصلی تابع عضویت (Siavanandam, et al, 2007)

هسته مجموعه فازی A در فضای مرجع X یک مجموعه صریح یا قطعی است که شامل همه

اجزایی است، که درجه عضویت برابر یک دارند. تکیه‌گاه مجموعه فازی A از مجموعه مرجع X یک

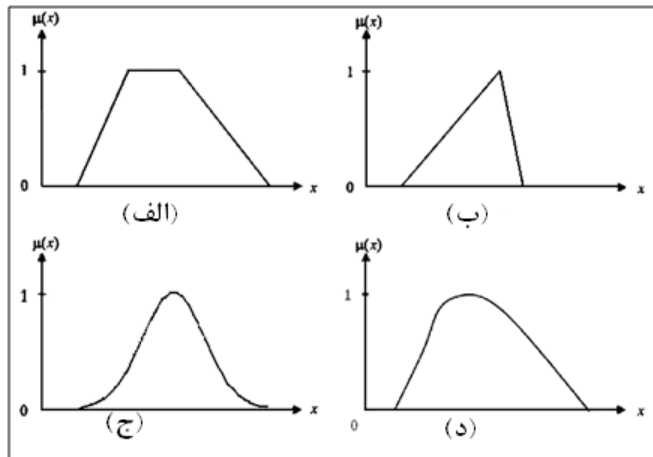
مجموعه صریح است که شامل همه اجزای X با درجه عضویت غیر صفر در A می‌باشد. مرز یک

¹ core

² support

³ boundary

مجموعه فازی A از مجموعه مرجع X یک مجموعه صریح است که شامل همه اجزای X با درجه عضویت بین صفر و یک است. در شکل ۳-۳ چهار نوع از معمول‌ترین توابع عضویت نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- چهار نوع از معمول‌ترین توابع عضویت: (الف)، دوزنقه‌ای (ب)، مثلثی (ج)، زنگوله‌ای (د) گوسین (Ying, 2000)

سیستم‌های فازی، سیستم‌هایی هستند با تعریف دقیق و کنترل فازی نیز نوع خاصی از کنترل غیرخطی می‌باشد که آن هم دقیقاً تعریف می‌شود. این مطلب مشابه کنترل و سیستم‌های خطی می‌باشد که واژه خطی یک واژه فنی بوده که حالت و وضعیت سیستم و کنترل را مشخص می‌کند. چنین چیزی نیز در مورد واژه فازی وجود دارد. اساساً گرچه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تئوری دقیق می‌باشد. در این تحقیقات دو نوع توجیه برای سیستم‌های فازی یافته شده است (Wang, 1997):

الف) دنیای واقعی ما بسیار پیچیده تر از آن است که بتوان یک توصیف و تعریف دقیق برای آن بدست آورد، بنابراین باید یک توصیف تقریبی یا همان فازی که قابل قبول و قابل تجزیه و تحلیل باشد، برای یک مدل معرفی شود.

ب) با حرکت ما به سوی اطلاعات، دانش و معرفت بشری بسیار اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین ما به فرضیه‌ای نیاز داریم که بتواند دانش بشری را به شکلی سیستماتیک فرموله کرده و آنرا به همراه سایر مدل‌های ریاضی در سیستم‌های مهندسی قرار دهد.

توجیه اول گرچه درست است، با این حال طبیعت واحدی را برای تئوری سیستم‌های فازی مشخص نمی‌کند. در حقیقت تمامی نظریه‌های علوم مهندسی، دنیای واقعی را به شکل تقریبی، توصیف می‌کنند. به عنوان مثال در عالم واقع تمامی سیستم‌ها به صورت غیر خطی می‌باشند ولی تقریباً تمامی مطالعات و بررسی‌ها بر روی سیستم‌های خطی می‌باشند. یک تئوری مهندسی خوب از یک سو باید بتواند مشخصه‌های اصلی و کلیدی دنیای واقعی را توصیف کرده و از سویی دیگر قابل تجزیه و تحلیل ریاضی باشد. بنابراین از این جنبه، تئوری فازی تفاوتی با سایر تئوری‌های علوم مهندسی ندارد. توجیه دوم مشخصه واحدی از سیستم‌های فازی را توصیف کرده و وجود تئوری سیستم‌های فازی را به عنوان یک شاخه مستقل در علوم مهندسی توجیه می‌کند. بعنوان یک قاعده کلی یک تئوری مهندسی خوب باید قادر باشد از تمامی اطلاعات موجود به نحو موثری استفاده کند.

در سیستم‌های عملی اطلاعات مهم از دو منبع سرچشمه می‌گیرند. یکی از منابع افراد خبره می‌باشند که دانش و آگاهی‌شان را در مورد سیستم با زبان طبیعی تعریف می‌کنند. منبع دیگر اندازه‌گیری‌ها و مدل‌های ریاضی هستند که از قواعد فیزیکی مشتق شده‌اند. بنابراین یک مسئله مهم ترکیب این دو نوع اطلاعات در طراحی سیستم‌ها است. سؤال کلیدی برای انجام این ترکیب این است که چگونه می‌توان دانش بشری را در چهارچوبی مشابه مدل‌های ریاضی فرموله کرد. به عبارت دیگر سؤال اساسی این است که چگونه می‌توان دانش بشری را به یک فرمول ریاضی تبدیل کرد. اساساً آنچه که یک سیستم فازی انجام می‌دهد، همین تبدیل است. برای اینکه بدانیم این تبدیل چگونه صورت می‌گیرد، باید بدانیم سیستم‌های فازی، چگونه سیستم‌هایی هستند (Wang, 1997).

۲-۳- ساختار سیستم‌های فازی

سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد^۱ می‌باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر - آنگاه فازی یک

^۱ Knowledge - based or rule - based systems

عبارت اگر - آنگاه بوده که بعضی کلمات آن بوسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده‌اند (Wang, 1997).

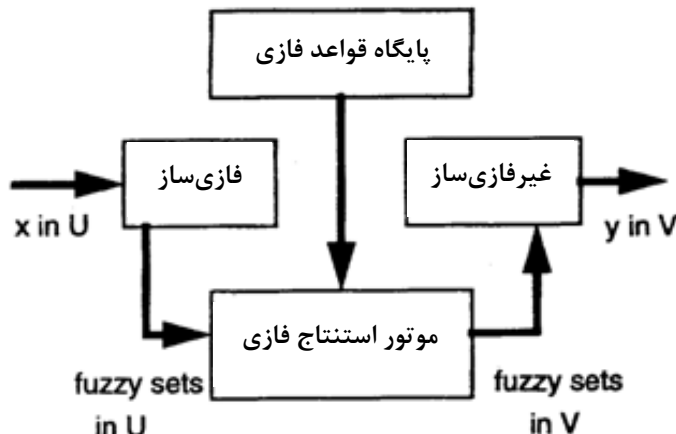
بطور خلاصه، نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی بدست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر آنگاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی می‌باشد. مرحله بعدی ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است. سیستم‌های فازی مختلف از اصول و روش‌های متفاوتی برای ترکیب این قواعد استفاده می‌کنند (Wang, 1997).

بنابراین سؤال اساسی این است، چه نوع سیستم‌های فازی معمولاً استفاده می‌شود؟ در کتب و مقالات معمولاً از سه نوع سیستم فازی صحبت به میان می‌آید: (۱) سیستم فازی خالص، (۲) سیستم‌های فازی تاکاگی سوگنو و کانگ^۱ (TSK) و (۳) سیستم‌های فازی با فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز. مشکل اصلی در رابطه با سیستم‌های فازی خالص این است که ورودی‌ها و خروجی‌های آن مجموعه‌های فازی می‌باشند (واژه‌هایی در زبان طبیعی). در حالی که در سیستم‌های مهندسی، ورودی‌ها و خروجی‌ها متغیرهایی با مقادیر حقیقی می‌باشند. برای حل این مشکل، آقایان تاکاگی سوگنو و کانگ نوع دیگری از سیستم‌های فازی را معرفی کرده‌اند که ورودی‌ها و خروجی‌های آن متغیرهایی با مقادیر واقعی هستند. مشکلات عمده سیستم‌های فازی TSK عبارتند از: (۱) قواعد آنگاه قواعد یک فرمول ریاضی بوده و بنابراین چهارچوبی را برای نمایش دانش بشری فراهم نمی‌کند. (۲) این سیستم امکان اعمال اصول مختلف منطق فازی را نداشته و در نتیجه انعطاف پذیری سیستم‌های فازی در این ساختار وجود ندارد. برای حل این مشکلات از نوع سومی از سیستم‌های فازی یعنی سیستم‌های فازی با فازی‌سازها و غیرفازی‌سازها استفاده می‌شود (Wang, 1997).

به منظور استفاده از سیستم‌های فازی خالص در سیستم‌های مهندسی، یک روش ساده اضافه کردن یک فازی‌ساز در ورودی که متغیرهای با مقادیر حقیقی را به یک مجموعه فازی تبدیل کرده و یک غیرفازی‌ساز که مجموعه فازی را به یک متغیر با مقدار حقیقی در خروجی تبدیل می‌کند،

¹ Takagi – Sugeno - Kang

می‌باشد. نتیجه یک سیستم فازی با فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز بوده که در شکل ۳-۴ نشان داده شده که در بخش‌های بعدی هر یک از این بخش‌ها تشریح شده است. این سیستم فازی معایب سیستم فازی خالص و سیستم فازی TSK را می‌پوشاند. از این پس در این مطالعه سیستم فازی با فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز، به صورت خلاصه تحت عنوان سیستم فازی بیان شده است (Wang, 1997).



شکل ۳-۴- ساختار اصلی سیستم‌های فازی با فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز (Wang, 1997)

۳-۲-۱- پایگاه قواعد فازی

یک پایگاه قواعد فازی از مجموعه‌ای از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل می‌شود. پایگاه قواعد فازی از این نظر که سایر اجزاء سیستم فازی برای پیاده سازی این قواعد به شکل موثر و کارا استفاده می‌شوند، قلب یک سیستم فازی محسوب می‌شود. بطور مشخص، پایگاه قواعد فازی شامل قواعد اگر - آنگاه فازی مطابق رابطه (۳-۳) است.

$$Ru^1: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^1 \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_n^1 \text{ Then } y \text{ is } B^1 \quad (3-3)$$

که A_i^1 و B^1 به ترتیب مجموعه‌های فازی در $U_i \subset R$ و $V \subset R$ هستند و همچنین $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ و $y \in V$ به ترتیب متغیرهای ورودی و خروجی (زبانی) سیستم فازی می‌باشند. فرض کنید M تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی باشد یعنی $l = 1, 2, \dots, M$ قواعدی به شکل (۳-۳) قواعد کانونیک نامیده می‌شوند (Wang, 1997).

۳-۲-۲- موتور استنتاج فازی

با توجه به توضیحات بخش قبل، یک سیستم منطقی همه قواعد را به ازای ورودی‌های داده شده بررسی می‌نماید و خروجی مربوط را محاسبه می‌نماید. سیستم منطقی که قواعد را بررسی می‌نماید و خروجی مربوطه را تعیین می‌نماید، موتور استنتاج فازی نامیده می‌شود. موتورها (البته به عنوان بخشی از سیستم کامل) توسط استفاده کننده می‌تواند نوشته شود یا می‌توان به خریداری آنها در بازار اقدام نمود (Wang, 1997).

در حالت کلی دو روش مختلف برای طراحی موتور استنتاج وجود دارد. استنتاج مبتنی بر ترکیب قواعد و استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه. در استنتاج مبتنی بر ترکیب قواعد، تمامی قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی در یک رابطه فازی ترکیب شده و آنگاه بدیده یک قاعده اگر - آنگاه فازی تنها نگریسته می‌شود اما در استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه، هر قاعده در پایگاه قواعد فازی یک خروجی فازی را معین کرده و خروجی نهایی، ترکیب M خروجی جداگانه مجموعه‌های فازی خواهد بود. در ادامه فرمول‌های تعدادی از موتورهای استنتاج که عموماً در سیستم‌های فازی و کنترل فازی استفاده می‌شوند نشان داده شده‌اند که همه روابط از این قرار هستند که با داشتن مجموعه فازی A^* در ورودی، موتورهای استنتاج مجموعه فازی B^* را در خروجی ایجاد می‌کنند (Wang, 1997).
الف) موتور استنتاج حاصلضرب: این موتور استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه می‌باشد که به طور خلاصه رابطه ریاضی آن به صورت رابطه (۴-۳) می‌باشد.

$$\mu_{B^*}(y) = \max_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \mu_{A^*}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^*}(x_i) \mu_{B^*}(y) \right] \quad (4-3)$$

ب) موتور استنتاج مینیمم: موتور استنتاج مینیمم هم مانند موتور استنتاج حاصلضرب مبتنی بر قواعد جداگانه بوده که به صورت رابطه (۵-۳) فرموله می‌شود.

$$\mu_{B^*}(y) = \max_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \min(\mu_{A^*}(x), \mu_{A_1^*}(x_1), \dots, \mu_{A_n^*}(x_n)) \mu_{B^*}(y) \right] \quad (5-3)$$

موتور استنتاج حاصلضرب و موتور استنتاج مینیمم مهم‌ترین موتورهای استنتاج مورد استفاده در سیستم‌های فازی و کنترل فازی هستند. مهم‌ترین مزیت آن‌ها در سادگی محاسباتشان می‌باشد. این مسئله به خصوص در مورد موتور استنتاج حاصلضرب برقرار است، ضمن اینکه برای بسیاری از کاربردهای عملی به خصوص برای کنترل فازی معنای خاصی دارند.

پ) موتور استنتاج لوکاشیویکز: این موتور استنتاج هم مبتنی بر قواعد جداگانه بوده که به صورت رابطه (۶-۳) فرموله می‌شود.

$$\mu_{B^*}(y) = \min_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \min \{ \mu_{A^*}(x), 1 - \min_{i=1}^n (\mu_{A_i}(x_i)) + \mu_{B^i}(y) \} \right] \quad (6-3)$$

ت) موتور استنتاج زاده: موتور استنتاج زاده هم مبتنی بر قواعد جداگانه بوده و در رابطه (۷-۳) آمده است.

$$\mu_{B^*}(y) = \min_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \min \{ \mu_{A^*}(x), \max(\min_{i=1}^n (\mu_{A_i}(x_i)), \mu_{B^i}(y), 1 - \min_{i=1}^n (\mu_{A_i}(x_i))) \} \right] \quad (7-3)$$

۳-۲-۳- فازی‌سازها

از بخش‌های قبلی دریافتیم که موتور استنتاج فازی، قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی را به وسیله یک نگاشت از مجموعه فازی A^* در ورودی به مجموعه فازی B^* در خروجی ترکیب می‌کند. به دلیل اینکه در اغلب کاربردها ورودی و خروجی سیستم فازی اعداد حقیقی هستند، باید از واسطه‌هایی بین موتور استنتاج فازی و محیط استفاده کنیم این واسطه‌ها در ورودی همان فازی‌سازها هستند که به عنوان نگاشتی از یک نقطه $X^* \in U \in R^n$ به یک مجموعه فازی A^* در U تعریف شده است که در زیر به معرفی سه نوع فازی‌ساز می‌پردازیم (Wang, 1997).

الف) فازی‌ساز منفرد: فازی‌ساز منفرد یک نقطه $X^* \in U$ با مقدار حقیقی را به یک نقطه منفرد فازی A^* در U می‌نگارد که مقدار تعلق در نقطه X^* برابر با ۱ و در سایر نقاط U برابر با صفر می‌باشد، که به صورت رابطه (۷-۳) فرموله می‌شود.

$$\mu_{A^*}(x) = \begin{cases} 1 & : x = x^* \\ 0 & : \text{other} \end{cases} \quad (7-3)$$

ب) فازی‌ساز گوسین: فازی‌ساز گوسین نقطه $x^* \in U$ را به مجموعه فازی A^* در U با تابع تعلق گوسین مطابق رابطه (۸-۳) می‌نگارد.

$$\mu_{A^*}(x) = e^{-\left[\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right]^2} \times \dots \times e^{-\left[\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right]^2} \quad (8-3)$$

ج) فازی‌ساز مثلثی: فازی‌ساز مثلثی نقطه $x^* \in U$ را به مجموعه فازی A^* در U با تابع تعلق مثلثی مطابق رابطه (۹-۳) می‌نگارد.

$$\mu_{A^*}(x) = \begin{cases} \left[1 - \frac{x_1 - x_1^*}{b_1}\right] \times \dots \times \left[1 - \frac{x_n - x_n^*}{b_n}\right] & |x_i - x_i^*| \leq b_i \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (9-3)$$

مشاهده می‌شود که هر سه فازی‌ساز رابطه $\mu_{A^*}(x^*) = 1$ را ارضاء می‌کنند، یعنی اینکه نگاشت این توابع تعلق به صورتی است که مقدار تابع تعلق مجموعه فازی $\mu_{A^*}(x)$ در نقطه $x = x^*$ بیشترین مقدار را دارد.

۳-۲-۴- غیرفازی‌سازها

غیرفازی‌ساز به عنوان یک نگاشت از مجموعه فازی B^* در $V \subset R$ (که خروجی موتور استنتاج فازی است) به یک نقطه قطعی $y^* \in V$ تعریف می‌گردد. بطور مفهومی، وظیفه فازی‌ساز مشخص کردن نقطه‌ای است که بهترین نماینده مجموعه فازی B^* باشد. این موضوع مشابه مقدار میانگین یک متغیر تصادفی می‌باشد. با این حال از آنجا که مجموعه فازی B^* به طرق مختلفی شناخته می‌شود انتخاب‌های مختلفی برای این نقطه وجود دارد. در ادامه به معرفی سه نوع غیرفازی‌ساز می‌پردازیم. برای تمام این غیرفازی‌سازها، فرض می‌کنیم که مجموعه فازی B^* به وسیله یکی از موتورهای استنتاج فازی معرفی شده در بخش‌های قبلی بدست آمده است (Wang, 1997).

الف) غیرفازی‌ساز مرکز ثقل: غیرفازی‌ساز مرکز ثقل، نقطه y^* را به عنوان مرکز ناحیه‌ای که بوسیله تابع تعلق B^* پوشش داده شده، تعریف می‌کند، که در رابطه (۱۰-۳) آمده است.

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B^*}(y) dy}{\int_V \mu_{B^*}(y) dy} \quad (10-3)$$

مزیت غیرفازی‌ساز مرکز ثقل در توجیه پذیری شهودی آن بوده و اشکال آن در پیچیدگی محاسبات آن می‌باشد. در حقیقت، تابع تعلق $\mu_{B^*}(y)$ معمولاً یک تابع بی‌قاعده و غیرمتعارف می‌باشد، بنابراین محاسبه انتگرال (۱۰-۳) بسیار مشکل خواهد بود.

ب) غیرفازی‌ساز میانگین مراکز: از آنجا که مجموعه فازی B^* ، اجتماع یا اشتراک M مجموعه فازی با وزن‌هایی برابر با ارتفاع مجموعه‌های فازی متناظر می‌باشد. به طور مشخص، فرض کنید \bar{y}^l مرکز مجموعه فازی l ام و w_1 درجه ارتفاع آن باشد، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز y^* را مطابق رابطه (۱۱-۳) تعریف می‌کند.

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l w_1}{\sum_{l=1}^M w_1} \quad (11-3)$$

غیرفازی‌ساز میانگین مراکز متداول‌ترین غیرفازی‌ساز مورد استفاده در سیستم‌های فازی و کنترل فازی می‌باشد. همچنین تغییرات کوچک در \bar{y}^l و w_1 تغییرات کوچکی را در y^* نتیجه می‌دهد.

ج) غیرفازی‌ساز ماکزیمم: غیرفازی‌ساز ماکزیمم نقطه y^* را بعنوان نقطه‌ای که در V که $\mu_{B^*}(y)$ به مقدار ماکزیمم خودش می‌رسد، تعریف می‌کند.

مجموعه‌ی رابطه (۱۲-۳) را در نظر بگیرید.

$$\text{hgt}(B^*) = \{y \in V \mid \mu_{B^*}(y) = \sup_{y \in V} \mu_{B^*}(y)\} \quad (12-3)$$

بدین معنی که $\text{hgt}(B^*)$ مجموعه تمام نقاطی از مجموعه V است که در آنها $\mu_{B^*}(y)$ به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. غیرفازی‌ساز ماکزیمم، نقطه y^* را به عنوان یک عضو دلخواه $\text{hgt}(B^*)$ تعریف می‌کند. اگر $\text{hgt}(B^*)$ شامل یک نقطه باشد، آنگاه y^* به شکل واحدی تعریف می‌شود. اگر $\text{hgt}(B^*)$ شامل بیش از یک نقطه باشد، آنگاه هنوز نقطه y^* به عنوان یک عضو دلخواه $\text{hgt}(B^*)$ تعریف می‌شود، یا اینکه از کوچکترین ماکزیمم، بزرگترین ماکزیمم یا میانگین ماکزیمم استفاده کنیم.

بطور دقیق‌تر غیرفازی‌ساز کوچکترین ماکزیمم به شکل رابطه (۱۳-۳) تعریف می‌شود.

$$y^* = \inf\{y \in \text{hgt}(B^*)\} \quad (13-3)$$

غیرفازی‌ساز بزرگترین ماکزیمما به شکل رابطه (۱۴-۳) تعریف می‌شود.

$$y^* = \sup\{y \in \text{hgt}(B^*)\} \quad (14-3)$$

و غیرفازی‌ساز میانگین ماکزیمما به شکل رابطه (۱۵-۳) تعریف می‌شود.

$$y^* = \frac{\int_{\text{hgt}(B^*)} y dy}{\int_{\text{hgt}(B^*)} dy} \quad (15-3)$$

که $\int_{\text{hgt}(B^*)}$ برای بخش پیوسته $\text{hgt}(B^*)$ همان انتگرال متداول و برای بخش گسسته $\text{hgt}(B^*)$ همان جمع می‌باشد. احساس می‌شود که غیرفازی‌ساز میانگین ماکزیمما ممکن است نتایجی را به ما بدهد که با درکی که از ماکزیمم تعلق داریم، متناقض باشد. اما غیرفازی‌سازهای ماکزیمم از لحاظ شهودی توجیه پذیر بوده، ضمن اینکه از نظر محاسباتی ساده می‌باشد. با این حال تغییرات کوچک در B^* ممکن است باعث تغییرات بزرگ در y^* گردد.

به عنوان نتیجه‌گیری لازم است بر روی یک مشخصه سیستم‌های فازی تاکید شود. سیستم‌های فازی از یک سو نگاهت‌هایی به صورت چند ورودی و یک خروجی از یک بردار با مقادیر حقیقی به یک اسکالر با مقادیر حقیقی بوده (نگاشت چند خروجی را می‌توان با ترکیب چند نگاشت یک خروجی بوجود آورد) که روابط دقیق ریاضی این نگاهت‌ها را می‌توان بدست آورد و از سوی دیگر سیستم‌های فازی سیستم‌های فازی مبتنی بر دانش بوده که از روی دانش بشری به شکل قواعد اگر - آنگاه ساخته می‌شوند (Wang, 1997).

جنبه مهم تئوری سیستم‌های فازی این است که یک فرایند سیستماتیک برای تبدیل یک پایگاه دانش به یک نگاهت غیر خطی فراهم می‌سازد. بهمین دلیل ما قادر خواهیم بود که از سیستم‌های مبتنی بر دانش (سیستم‌های فازی) در کاربردهای مهندسی (نظیر کنترل، پردازش سیگنال، سیستم‌های مخابراتی و ...) استفاده نماییم. هم‌چنین از آن‌جا که ما می‌توانیم از مدل‌های ریاضی

استفاده کنیم، در نتیجه تجزیه تحلیل و طراحی سیستم‌ها را می‌توان به صورت یک مدل خشک ریاضی نیز انجام داد (Wang, 1997).

۳-۳- طراحی سیستم‌های فازی از روی زوج‌های ورودی - خروجی

از نقطه نظر مفهومی، طراحی سیستم‌های فازی از روی زوج‌های ورودی - خروجی را می‌توان به دو روش تقسیم بندی کرد. در روش اول ابتدا از روی زوج‌های ورودی - خروجی قواعد اگر - آنگاه فازی تولید شده و سپس با انتخاب موتور استنتاج، فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز مطلوب سیستم فازی از روی این قواعد ساخته می‌شود. در روش دوم ابتدا ساختار سیستم فازی مشخص می‌شود در این ساختار تعدادی پارامتر متغیر وجود خواهد داشت، این پارامترها از روی داده‌های ورودی - خروجی تعیین می‌شود. با توجه به کارایی بیشتر روش دوم، در ادامه این روش توضیح داده شده است (Wang, 1997).

برای مشخص کردن ساختار سیستم فازی، موتور استنتاج ضرب، فازی‌ساز منفرد، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز و توابع تعلق گوسین مطابق رابطه (۱۶-۳) انتخاب شده است. بدین معنی که سیستم فازی مورد نظر شکلی مطابق رابطه (۱۶-۳) دارد (Wang, 1997).

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left[\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right]^2 \right] \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left[\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right]^2 \right] \right]} \quad (16-3)$$

که M برابر با تعداد قواعد فازی، n تعداد ورودی‌های سیستم، $f(x)$ خروجی معادل ورودی‌ها، x_i مقدار پارامتر ورودی l ام و $\bar{x}_i^l, \bar{y}^l, \sigma_i^l$ پارامترهایی متغیر می‌باشند که \bar{x}_i^l مکان مرکز تابع عضویت l ام پارامتر ورودی l ام، \bar{y}^l مکان مرکز تابع عضویت l ام پارامتر خروجی و σ_i^l نشان دهنده میزان بازشدگی تابع عضویت l ام پارامتر ورودی l ام می‌باشد.

گرچه ساختار سیستم فازی مطابق رابطه بالا انتخاب شده ولی سیستم هنوز طراحی نشده است چرا که پارامترهای $\sigma_i^1, \bar{y}_i^1, \bar{x}_i^1$ مشخص نشده‌اند و با تعیین پارامترهای $\sigma_i^1, \bar{y}_i^1, \bar{x}_i^1$ است که سیستم فازی طراحی خواهد شد به عبارت دیگر طراحی سیستم فازی معادل تعیین پارامترهای $\sigma_i^1, \bar{y}_i^1, \bar{x}_i^1$ می‌باشد. از آنجایی که طراحی و خصوصاً بهینه‌سازی سیستم‌های فازی می‌توانند بسیار زمان‌بر باشد داشتن الگوریتمی که سیستم فازی را به صورت خودکار بسازد و بهینه کند مناسب می‌باشد (Wang, 1997).

روش‌های متداول تعیین پارامترهای $\sigma_i^1, \bar{y}_i^1, \bar{x}_i^1$ عبارتند از (Cordon, Herrera, Hoffmann,) (Magdalena, 2001. Espinosa, Vandewalle, Wertz, 2005): (۱) روش‌های مبتنی بر گرادیان^۱ مثل: گرادیان نزولی، گرادیان نزولی و یک مرحله تخمین کمترین مربعات، گرادیان‌های مرتبه دوم (نیوتن، گوس نیوتن، لونبرگ مارکوات) و کالمن فیلتر و (۲) روش‌های آزاد از گرادیان^۲ مثل: الگوریتم-های تکاملی (الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌سازی جمعی ذرات، الگوریتم رقابت استعماری) و روش‌های اکتشافی.

در ادامه روش گرادیان نزولی از روش‌های مبتنی بر گرادیان و روش‌های بهینه‌سازی جمعی ذرات و الگوریتم رقابت استعماری از روش‌های آزاد از گرادیان معرفی شده‌اند.

۳-۳-۱- طراحی سیستم‌های فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان

نزولی

برای تعیین پارامترها، نمایش سیستم فازی $f(x)$ رابطه (۳-۱۶) به شکل یک شبکه پیش‌خور، مفید می‌باشد. به‌طور مشخص نگاشتی از ورودی $x \in U \subset R^n$ به خروجی $f(x) \in V \subset R$ می‌تواند مطابق عملیات زیر پیاده‌سازی شود (Wang, 1997).

ابتدا ورودی x از یک عملگر ضرب گوسین عبور کرده و به رابطه (۳-۱۷) تبدیل می‌شود.

¹ Gradient Based Methods

² Gradient Free Methods

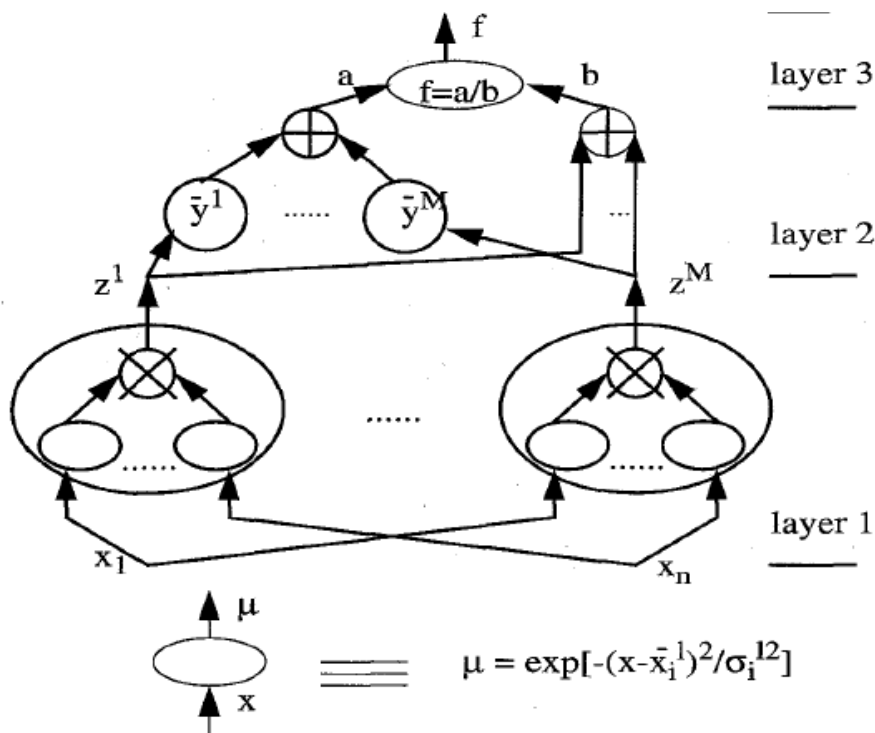
$$z^l = \prod_{i=1}^n \exp \left[- \left[\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right]^2 \right] \quad (17-3)$$

سپس z^l از یک عملگر جمع کننده عبور کرده و عملگر جمع کننده وزنی مقادیر رابطه (۱۸-۳) را نتیجه می‌دهد.

$$a = \sum_{l=1}^M \bar{y}^l z^l \quad \text{و} \quad b = \sum_{l=1}^M z^l \quad (18-3)$$

سرانجام خروجی سیستم فازی به صورت $f(x) = \frac{a}{b}$ محاسبه می‌شود.

این عملکرد سه مرحله‌ای در شکل ۳-۵ به شکل یک شبکه سه لایه پیش‌خور نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- شبکه سه لایه پیش‌خور سه مرحله‌ای (Wang, 1997)

هدف مورد نظر طراحی سیستم فازی $f(x)$ مطابق رابطه (۱۶-۳) است، به نحوی که خطای

تطبيق مطابق رابطه (۱۹-۳)، مینیمم گردد (Wang, 1997).

$$e^p = \frac{1}{2} [f(x_0^p) - y_0^p]^2 \quad (19-3)$$

بدین معنی که هدف تعیین پارامترهای $\sigma_i^l, \bar{y}^l, \bar{x}_i^l$ است، به نحوی که e^p کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. در ادامه بحث از e, f, y به ترتیب برای نمایش $e^p, f(x_0^p)$ و y_0^p استفاده شده است.

ابتدا از الگوریتم گرادیان نزولی برای تعیین \bar{y}^l مطابق رابطه (۲۰-۳) استفاده شده است.

$$\bar{y}^l(k+1) = \bar{y}^l(k) - \alpha \frac{\partial e}{\partial y^{-l}} \quad (20-3)$$

که $l=1,2,\dots,M$ و $k=0,1,2,\dots$ و یک عدد ثابت بوده، که طول گام را مشخص می‌کند. اگر هنگامی که k به سمت بینهایت می‌رود، $\bar{y}^l(k)$ همگرا شود، آن‌گاه از رابطه (۲۱-۳) در نقطه همگرایی رابطه (۲۱-۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial e}{\partial y^{-l}} = 0 \quad (21-3)$$

که بدین معنی است که، همگرایی \bar{y}^l در یک نقطه مینیمم محلی e می‌باشد. با توجه شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود که f و e (در نتیجه e) فقط از طریق a به \bar{y}^l بستگی دارد. بنابراین با استفاده از قاعده زنجیره‌ای رابطه (۲۲-۳) به دست آمده است.

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^l} = (f-y) \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \bar{y}^l} = (f-y) \frac{1}{b} z^l \quad (22-3)$$

با جایگذاری رابطه (۲۲-۳) در رابطه (۲۰-۳) الگوریتم آموزش برای \bar{y}^l مطابق رابطه (۲۳-۳) به دست آمده است.

$$\bar{y}^l(k+1) = \bar{y}^l(k) - \alpha \frac{f-y}{b} z^l \quad (23-3)$$

که $l=1,2,\dots,M$ و $k=0,1,2,\dots$

از الگوریتم گرادیان نزولی برای تعیین \bar{x}_i^l مطابق رابطه (۲۴-۳) استفاده شده است.

$$\bar{x}_i^l(k+1) = \bar{x}_i^l(k) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \bar{x}_i^l} \quad (24-3)$$

که $l=1,2,\dots,M$ و $k=0,1,2,\dots$ و $i=1,2,\dots,n$

با توجه شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود که f و e (در نتیجه e) فقط از طریق z^l به \bar{x}_i^l بستگی دارد.

بنابراین با استفاده از قاعده زنجیره‌ای رابطه (۲۵-۳) به دست آمده است.

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{x}_i^l} = (f - y) \frac{\partial f}{\partial z^l} \frac{\partial z^l}{\partial \bar{x}_i^l} = (f - y) \frac{\bar{y}^l - f}{b} z^l \frac{2(x_{0i}^p - \bar{x}_i^l)}{\sigma_i^{l2}} \quad (25-3)$$

که p برابر با تعداد زوج داده‌های ورودی - خروجی و x_{0i}^p نشان دهنده مقدار ورودی نام از زوج داده ورودی - خروجی p ام می‌باشد.

با جایگذاری رابطه (25-3) در رابطه (24-3) الگوریتم آموزش برای \bar{x}_i^l مطابق رابطه (26-3) به دست آمده است.

$$\bar{x}_i^l(k+1) = \bar{x}_i^l(k) - \alpha(f - y) \frac{\bar{y}^l(k) - f}{b} z^l \frac{2(x_{0i}^p - \bar{x}_i^l(k))}{\sigma_i^{l2}(k)} \quad (26-3)$$

$$i=1,2,\dots,n \text{ و } k=0,1,2,\dots \text{ و } l=1,2,\dots,M$$

با استفاده از این روال، الگوریتم آموزش برای σ_i^l مطابق رابطه (27-3) به دست آمده است.

$$\sigma_i^l(k+1) = \sigma_i^l(k) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \sigma_i^l} \quad (27-3)$$

$$= \sigma_i^l(k) - \alpha(f - y) \frac{\bar{y}^l(k) - f}{b} z^l \frac{2(x_{0i}^p - \bar{x}_i^l(k))^2}{\sigma_i^{l3}(k)}$$

$$i=1,2,\dots,n \text{ و } k=0,1,2,\dots \text{ و } l=1,2,\dots,M$$

در الگوریتم‌های آموزش (23-3) و (26-3) و (27-3) از یک روال پس انتشار خطا برای تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}^l, \sigma_i^l$ استفاده شده است.

3-3-1-1- الگوریتم طراحی سیستم فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی

گام اول: تعیین ساختار سیستم مطابق رابطه (16-3) و تنظیم پارامترهای اولیه که عبارتند از تعداد قوانین فازی (M)، مقادیر اولیه مراکز توابع تعلق ورودی ($\bar{x}_i^l(0)$) و خروجی ($\bar{y}^l(0)$) و بازشدگی توابع تعلق ورودی ($\sigma_i^l(0)$).

گام دوم: تعیین خروجی سیستم فازی با استفاده از زوج داده اول مطابق رابطه (16-3).

گام سوم: به روز رسانی متغیرهای سیستم فازی ($\bar{x}_i^l(k+1)$)، ($\bar{y}^l(k+1)$) و ($\sigma_i^l(k+1)$).

با استفاده از روابط (23-3)، (26-3) و (27-3).

گام چهارم: بازگشت به گام دوم و تکرار گام دوم و سوم تا زمانی که خطا خروجی سیستم فازی
 $|f(x_0^p) - y_0^p|$ از مقدار پیش فرض کمتر شود.

گام پنجم: بازگشت به گام دوم و تکرار روند فوق برای زوج داده‌های بعدی.

گام ششم: بازگشت به گام دوم و آموزش مجدد سیستم فازی با استفاده از زوج داده‌های ورودی
 - خروجی، تا زمانی که سیستم فازی رضایت بخش گردد (Wang, 1997).

۳-۲-۳- طراحی سیستم‌های فازی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

تاکنون روش‌های ریاضی مختلفی برای حل مسائل غیرخطی و بهینه‌سازی مطرح شده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های لاگرانژ، گرادیان کاهشی، نیوتن و ... اشاره کرد. در اکثر این روش‌ها از اطلاعات مربوط به مشتق اول و یا دوم تابع هدف نسبت به متغیرهای کنترلی در هر گام برای حرکت به سوی نقطه بهینه استفاده می‌شود. ماهیت غیرخطی و نیز وجود برخی متغیرهای گسسته در توابع هدف، استفاده از این روش‌ها را با محدودیت مواجه می‌سازد. از این‌رو در حل مسائل از روش‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، Simulated Annealing، Tabu Search و ... که اساس کار آن‌ها جستجوی هدفمند فضای پاسخ می‌باشد، نیز استفاده می‌شود. در تمامی روش‌ها، از یک نقطه شروع به عنوان شرایط اولیه مسئله استفاده می‌شود و با داشتن اطلاعاتی از تابع هدف، نقطه بعدی به گونه‌ای انتخاب خواهد شد که حرکت همواره در جهت حداکثر کردن یا حداقل نمودن تابع هدف پیش رود. هرچند که تکنیک‌های جستجوی مبتنی بر جمعیت نمی‌تواند رسیدن به بهینه (بهترین راه حل) را تضمین کند، اما در صورت پیاده‌سازی مناسب، جواب‌های خیلی نزدیک به نقطه بهینه (بهترین راه حل) تعیین می‌گردند (Cordon, Herrera, Hoffmann, Magdalena, 2001).

همان‌طور که گفته شد، طراحی سیستم فازی معادل تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^1, \bar{y}_i^1, \sigma_i^1$ می‌باشد. بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن رابطه (۳-۱۶) به عنوان تابع f پارامترهای $\bar{x}_i^1, \bar{y}_i^1, \sigma_i^1$ را به نحوی تعیین نمود که مقدار تابع هزینه حداقل گردد. تابع هزینه مطابق رابطه (۳-۲۸) تعریف می‌شود (Jin,

Seelen, Sendhoff, 1999. Alcalá-Fdez, Alcalá, Gacto, Herrera, 2009. Gonzalez, Rojas, Pomares, Herrera, Guillen, Palomares, Rojas, 2007. Li, Wu, 2011. Leung, Lau, Kwong, 2003. Roy, 2006. Cordon, Herrera, Hoffmann, Magdalena, 2001. Cordon, Herrera, Villar, 2000. Cordon, Gomide, Herrera, Hoffmann, Magdalena, 2004. Cordon, Herrera, Villar, 2001).

$$\text{cost} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{n} \quad (28-3)$$

که در آن y مقدار خروجی سیستم فازی، f مقدار خروجی مورد نظر و n تعداد زوج داده‌های ورودی - خروجی می‌باشند.

۳-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات^۱

الگوریتم PSO یک الگوریتم جستجو است که بر اساس شبیه‌سازی رفتار پرندگان در یک گروه می‌باشد. این الگوریتم که از نوع الگوریتم‌های تکاملی است، در سال ۱۹۹۵ توسط Kennedy و Eberhart مطرح شد. هدف بدوی از مفهوم PS^2 شبیه‌سازی گرافیکی از رقص غیرقابل پیش‌بینی و زیبای پرندگان در گروه بود. ارزیابی از الگوهای بدست آمده، توانایی پرندگان در پروازهای همگام دسته جمعی و همزمان و هم‌چنین، قابلیت تغییر ناگهانی جهت حرکت آن‌ها را به سمت اطلاعات بهینه (غذا، شکار، فرار) را نشان می‌داد. از این وضعیت عینی ابتدایی، مفهومی که نمو پیدا کرد، یک الگوریتم مؤثر ساده بهینه‌سازی بود (Eberhart, Shi, 2001).

در PSO، افراد منحصر به فرد همان ذرات هستند که در فضایی در ابعاد بالا جاری هستند. تغییر در موقعیت ذرات در فضای جستجو بر اساس میل روحی و روانی اجتماع افرادی است که برای رسیدن به هدف با یکدیگر رقابت می‌کنند. بنابراین تغییرات یک ذره در اجتماع تحت تأثیر تجربه - دانش و همسایگانش است. رفتار جستجو از یک ذره، متأثر از ذرات دیگر در اجتماع است (بنابراین PSO یک الگوریتم همزیستی مشارکتی است). در نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرآیند جستجویی

¹ Particle Swarm Optimization

² particle-swarm

ایجاد می‌شود که در آن، ذرات به سمت مناطق موفقیت‌آمیز در فضای جستجو برمی‌گردند. عملیات در PSO بر اساس اصل همسایگی در شبکه اجتماعی می‌باشد (Kennedy and Eberhart, 1995a. Kennedy, 1997. Shi, Eberhart, 1998. Eberhart, Kennedy, 1995b).

نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که اساس رفتار هدفمند ذرات در PSO بر اساس دو اصل است که عبارتند از:

- ۱- دانش فردی: بر این اساس، هر فرد به سمت بهترین دانش قبلی خود حرکت می‌کند.
- ۲- دانش اجتماعی: بر این اساس فرد برحسب نوع ارتباط خودش با جامعه از بهترین اطلاعات دیگران برای ادامه حرکت استفاده می‌کند.

مدل‌سازی الگوریتم (Kennedy and Eberhart, 1995a. Kennedy, 1997. Shi, Eberhart, 2001. Eberhart, Kennedy, 1995b. Eberhart, Shi, 1998): در حرکت یک دسته از کلاغ‌ها، یک کلاغ (سرگروه) دارای بهترین موقعیت می‌باشد و بقیه کلاغ‌ها با توجه به موقعیت خود و کلاغ‌های مجاور سعی در بهتر کردن مکان و نزدیک شدن به سرگروه را دارند. در این حین چنان چه یکی از اعضا بتواند موقعیت بهتری نسبت به سرگروه پیدا کند او به عنوان سرگروه انتخاب می‌شود. عملکرد یک الگوریتم PSO نیز به این‌گونه است، به این صورت که دسته‌ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه بر طبق رفتار ذرات هجومی، بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند. در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. شایان ذکر است که تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود ذره در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است. برای شبیه‌سازی این رفتار، پارامترهای زیر تعریف می‌شود.

الف) $pbest$: این پارامتر، بیان‌گر بهترین موقعیتی است که هر ذره در طول اجرای الگوریتم می‌تواند کسب نماید.

ب) $gbest$: این متغیر بهترین موقعیتی را که تمامی ذرات گروه در طول اجرای الگوریتم کسب کرده‌اند، نشان می‌دهد.

ج) پارامتر شناخت فردی (c_1): این کمیت باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که پیدا کرده است، حرکت کند. این ضریب، به عنوان ضریب تحریک به کار می‌رود.

د) پارامتر شناخت اجتماعی (c_2): این ضریب که با عنوان ضریب تحریک نیز به کار می‌رود، باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که ذرات تا به حال کسب کرده‌اند، حرکت کند.

ه) ضریب لختی (w): این ضریب، باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلی و جستجوی کلی در الگوریتم می‌شود.

و) لغزش (v): این پارامتر، تغییر موقعیت ذره در محیط جستجو را نشان می‌دهد.

اکنون فرض کنید ذره j ام دارای بعد g باشد، که به صورت رابطه (۳-۲۹) بیان شده است.

$$x_j = [x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,g}] \quad (۳-۲۹)$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad \text{و} \quad g = 1, 2, \dots, m$$

که مقدار x بیانگر موقعیت ذره، n تعداد ذرات گروه و m تعداد اعضای تشکیل دهنده ذره (تعداد مجهول‌های تابع) می‌باشد.

تمام ذرات دارای یک $gbest$ و هر ذره دارای یک $pbest$ به صورت رابطه (۳-۳۰) می‌باشد.

$$pbest_j = [pbest_{j,1}, pbest_{j,2}, \dots, pbest_{j,g}] \quad (۳-۳۰)$$

مقدار لغزش ذره به صورت رابطه (۳-۳۱) محاسبه می‌شود.

$$v_{j,g}^{(t+1)} = wv_{j,g} + c_1 \cdot Rand \cdot (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c_2 \cdot Rand \cdot (gbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) \quad (۳-۳۱)$$

$$v_{\min} \leq v_{j,g}^{(t)} \leq v_{\max}$$

$$t = 1, 2, \dots$$

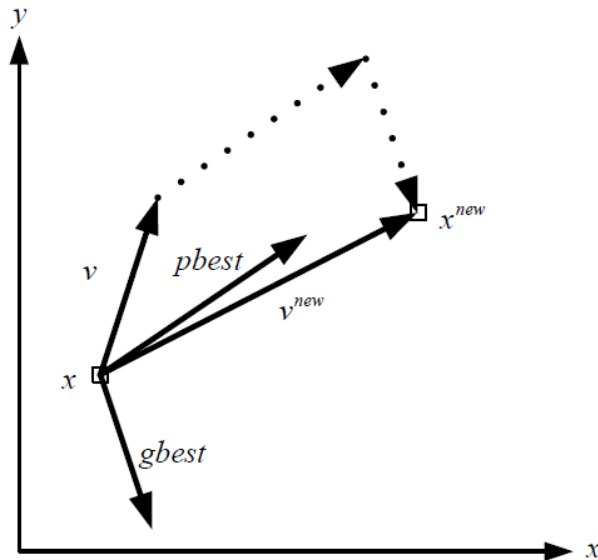
که تابع $Rand$ تولید کننده یک مقدار تصادفی بین صفر و یک می‌باشد.

آن‌گاه تغییر موقعیت ذره بر اساس مقدار لغزش نیز به صورت رابطه (۳-۳۲) بیان شده است.

$$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)}$$

(۳۲-۳)

فرایند فوق در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.



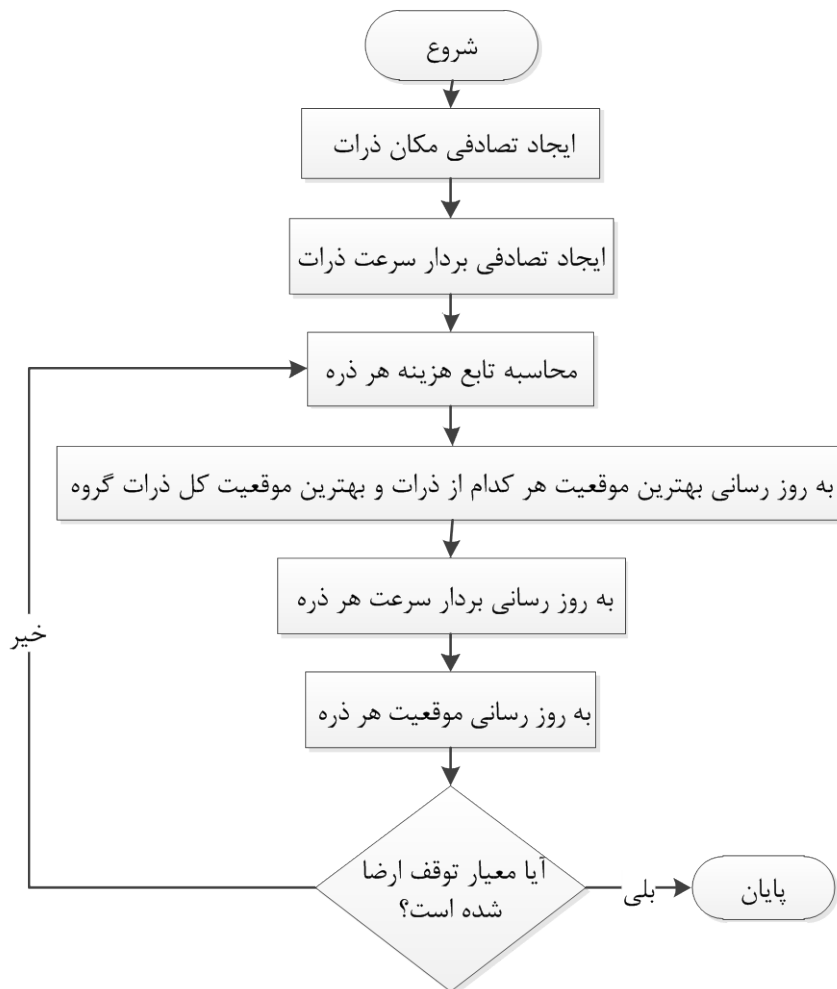
شکل ۳-۶- اساس کار الگوریتم PSO (Wu, Tasi, 2008)

در این روابط باید به این نکته توجه داشت که بزرگ بودن v_{max} ممکن است باعث شود که ذرات از روی نقطه مینیمم عبور کنند و کوچک بودن آن نیز باعث می‌شود که ذره، حول موقعیت خود به چرخش درآمده و قادر به جستجو در فضای آزمون نشود. مقدار v_{max} معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ درصد از محدوده متغیرها انتخاب می‌شود ($v_{min} = -v_{max}$). از طرف دیگر انتخاب مناسب w باعث تکرار کمتر الگوریتم برای رسیدن به نقطه بهینه می‌شود. در الگوریتم‌های معمولی PSO، ضریب w از مقدار ۰/۹ تا مقدار ۰/۴ در طول اجرای الگوریتم و بر اساس رابطه (۳۳-۳) کاهش می‌یابد (Hu, Shi, Eberhart, 2004. Shi, Eberhart, 1998).

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (۳۳-۳)$$

از دیگر مشکلات در اجرای این الگوریتم انتخاب مناسب c_1 و c_2 است. در بسیاری از الگوریتم‌ها، مقادیر c_1 و c_2 به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که $c_1 + c_2 \leq 4$ باشد. انتخاب $c_1 = c_2 = 2$ در بسیاری از الگوریتم‌ها توصیه شده است (Hu, Shi, Eberhart, 2004. Shi, Eberhart, 1998).

در شکل ۳-۷ فلوجارت استاندارد الگوریتم PSO نشان داده شده است.



شکل ۳-۷- فلوجارت استاندارد الگوریتم PSO (Kennedy and Eberhart, 1995a)

۳-۲-۲- الگوریتم رقابت استعماری

در این الگوریتم به استعمار به عنوان جزئی لاینفک از سیر تکامل تاریخی انسان نگریسته شده و از چگونگی اثرگذاری آن بر کشورهای استعمارگر و مستعمره و نیز کل تاریخ، به عنوان منبع الهام یک الگوریتم کارا و نو در زمینه محاسبات تکاملی استفاده شده است. به طور خلاصه، این الگوریتم، از چندین کشور در حالت اولیه شروع می‌شود. کشورها در حقیقت جوابهای ممکن مساله هستند و معادل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک و ذره در بهینه‌سازی گروه ذرات می‌باشند. همه‌ی کشورها، به دو دسته تقسیم می‌شوند: امپریالیست و مستعمره. کشورهای استعمارگر با اعمال سیاست جذب

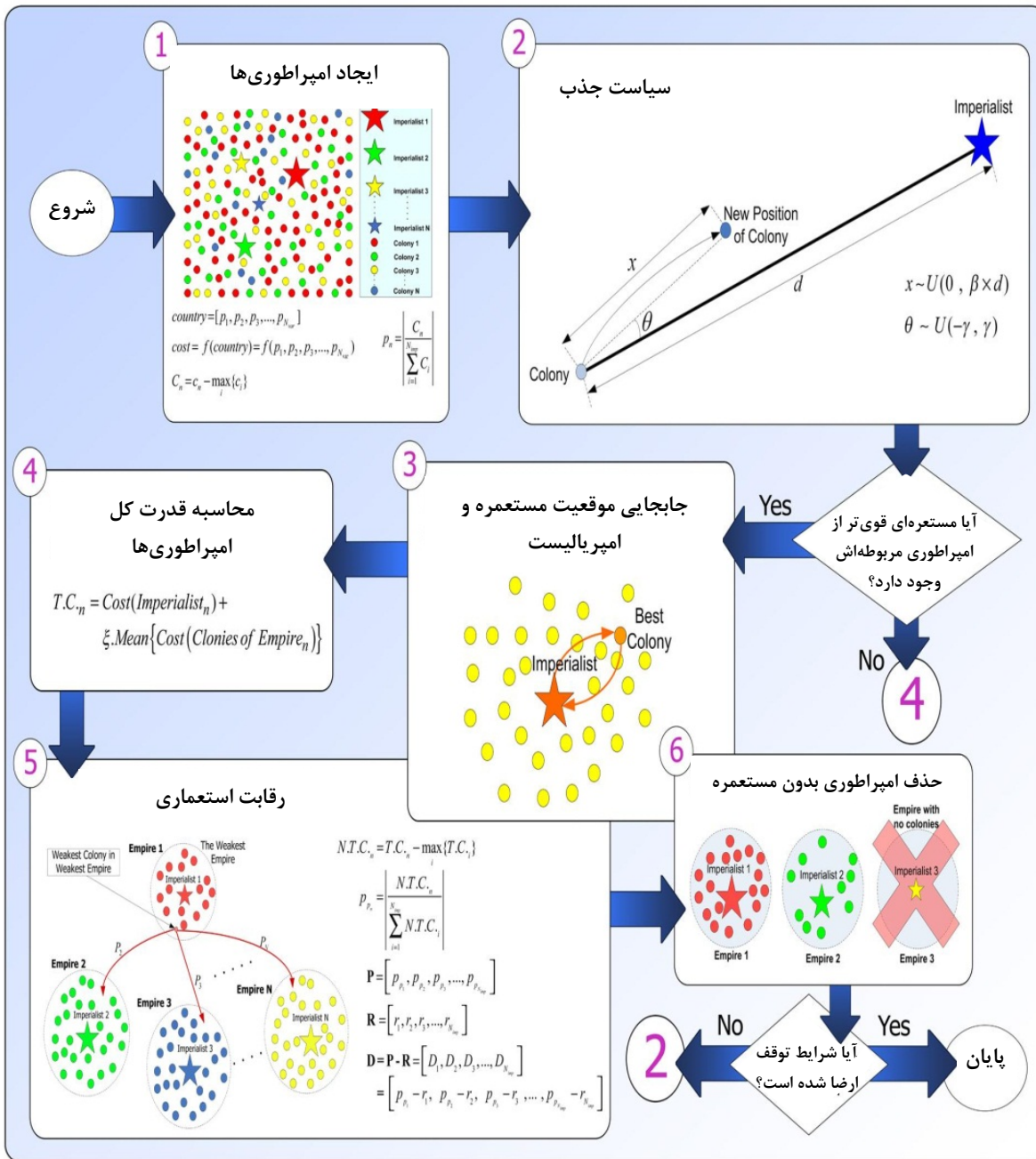
(همگون‌سازی) در راستای محورهای مختلف بهینه‌سازی، کشورهای مستعمره را به سمت خود می‌کشند. رقابت امپریالیستی در کنار سیاست همگون‌سازی، هسته‌ی اصلی این الگوریتم را تشکیل داده و باعث می‌شود که کشورها به سمت مینیمم مطلق تابع حرکت کنند (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

شکل ۳-۸ شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم، نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک "کشور" نامیده می‌شوند؛ شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست^۱ انتخاب می‌شوند. باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره^۲، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با روندی خاص که در ادامه آمده است؛ به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، بعلاوه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان امپراطوری‌ها شروع می‌گردد. هر امپراطوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و به سبب در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

¹ Imperialist

² Colony



شکل ۳-۸- شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷)

با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراتوری‌ها نزدیک‌تر شده و نوعی هم‌گرایی مشاهده خواهد شد. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراتوری واحد در دنیا وجود داشته باشد، با مستمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست، خیلی نزدیک هستند (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

در ادامه مباحث، بخش‌های مختلف الگوریتم، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱- شکل دهی امپراطوری های اولیه: آرایه ای از متغیرهای مسئله ای که باید بهینه شوند، یک کشور نامیده می شود. در یک مسئله ی بهینه سازی N_{var} بعدی، یک کشور، یک آرایه ی $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت رابطه (۳-۳۴) در نظر گرفته شده است.

$$country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \quad (3-34)$$

برای شروع الگوریتم، تعداد $N_{country}$ کشور اولیه ایجاد می شوند. N_{imp} تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان امپریالیست انتخاب شده و N_{col} کشور باقیمانده، مستعمراتی را تشکیل می دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند.

طبق رابطه (۳-۳۵) هزینه ی یک کشور با ارزیابی تابع f در متغیرهای $(p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}})$ یافته می شود.

$$cost_i = f(country_i) = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}) \quad (3-35)$$

به هر امپریالیست، تعدادی از مستعمرات که این تعداد، متناسب با قدرت آن است، اختصاص می یابد. بدین منظور، با داشتن هزینه همه امپریالیست ها، هزینه نرمالیزه آن ها به صورت رابطه (۳-۳۶) محاسبه می شود.

$$C_n = \max\{c_i\} - c_n \quad (3-36)$$

که در آن c_n ، هزینه امپریالیست n ام، $\max\{c_i\}$ بیشترین هزینه میان امپریالیست ها و C_n ، هزینه نرمالیزه شده این امپریالیست، می باشد. با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه ی هر امپریالیست، به صورت رابطه (۳-۳۷) محاسبه شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره، بین امپریالیست ها تقسیم می شوند.

$$p_n = \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \quad (3-37)$$

از یک دید دیگر، قدرت نرمالیزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن

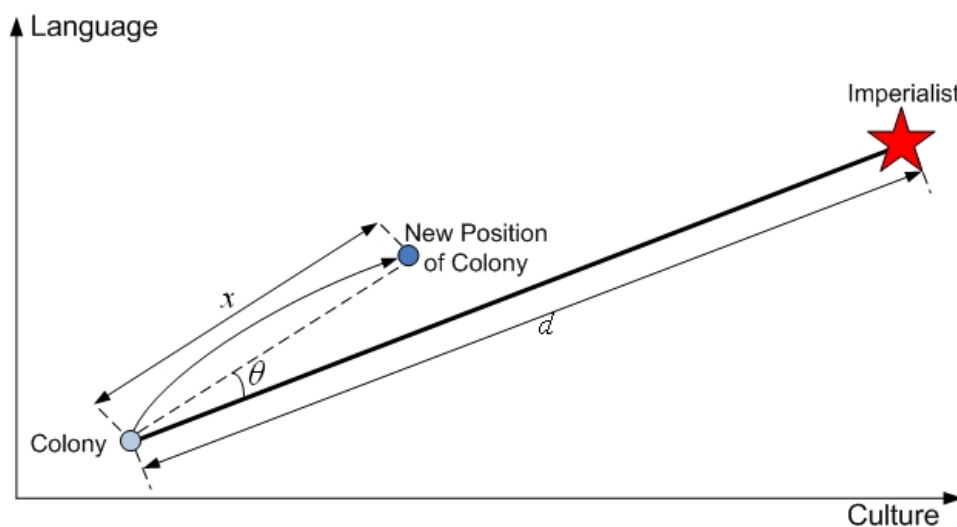
امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه‌ی مستعمرات یک امپریالیست برابر با رابطه (۳۸-۳) می‌باشد.

$$N.C._n = \text{round}\{p_n \cdot (N_{col})\} \quad (38-3)$$

که در آن $N.C._n$ ، تعداد اولیه‌ی مستعمرات یک امپراطوری و N_{col} نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه است. round نیز تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را تولید می‌کند (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007).

۲- مدل‌سازی سیاست جذب، حرکت مستعمره‌ها به سمت امپریالیست: این بخش از فرایند استعمار در الگوریتم بهینه‌سازی، به صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور امپریالیست، مدل شده است. کشور مستعمره، به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر، حرکت کرده و به موقعیت جدید کشانده می‌شود.

یک حقیقت آشکار در این زمینه این است که علی‌رغم اینکه کشورهای استعمارگر به طور جدی پیگیر سیاست جذب بودند، اما وقایع به طور کامل مطابق سیاست اعمال شده آنها پیش نمی‌رفت و انحرافات در نتیجه کار وجود داشت. در این الگوریتم، این انحراف احتمالی با افزودن یک زاویه تصادفی به مسیر جذب مستعمرات، انجام شده است. شکل ۳-۹ این حالت را نشان داده است.



شکل ۳-۹- حرکت واقعی مستعمرات به سمت امپریالیست (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007)

در شکل ۳-۹ فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شده است. x نیز مطابق رابطه (۳-۳۹) عددی تصادفی با توزیع یکنواخت می باشد.

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (3-39)$$

که در آن β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ می باشد. یک انتخاب مناسب می تواند $\beta = 2$ باشد. وجود ضریب $\beta > 1$ باعث می شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت های مختلف به آن نزدیک شود. زاویه انحراف احتمالی (θ) مطابق رابطه (۳-۴۰) به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده است.

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (3-40)$$

در این رابطه، γ پارامتری دلخواه می باشد که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می شود، تا مستعمرات تا حد ممکن، به بردار واصل مستعمره به استعمارگر، نزدیک حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\pi/4$ در اکثر پیاده سازی ها، انتخاب مناسبی بوده است (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007. Kaveh, Talatahari, 2010. Sadigh, Mozafari, Karimi, 2011).

۳- جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست: در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با هم دیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون سازی بر مستعمرات خود می کند (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007).

۴- قدرت کل یک امپراطوری: قدرت یک امپراطوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن که طبق رابطه (۳-۴۱) تعریف شده است.

$$T.C._n = Cost(imperialist_n) + \xi \text{ mean}\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (3-41)$$

که در آن $T.C._n$ هزینه کل امپراطوری n ام و ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و

نزدیک به صفر در نظر گرفته می شود. کوچک در نظر گرفتن ξ ، باعث می شود که هزینه کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست)، شود و افزایش ξ نیز باعث افزایش تاثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین هزینه کل آن می شود. در حالت نوعی $\xi=0.05$ در اکثر پیاده سازی به جوابهای مطلوبی منجر شده است (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007).

۵- رقابت استعماری: با فرض این که که امپراطوری در حال حذف، ضعیف ترین امپراطوری موجود است، در تکرار الگوریتم، یکی یا چند تا از ضعیف ترین مستعمرات ضعیف ترین امپراطوری برداشته شده و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان کلیه امپراطوری ها ایجاد می شود. مستعمرات مذکور، لزوماً توسط قویترین امپراطوری، تصاحب نخواهند شد، بلکه امپراطوری های قوی-تر، احتمال تصاحب بیشتری دارند. برای مدل سازی رقابت میان امپراطوری ها برای تصاحب این مستعمرات، به ترتیب رابطه (۳-۴۲)، از روی هزینه کل امپراطوری هزینه کل نرمالیزه شده آن تعیین می شود.

$$N.T.C._n = \max_i \{T.C._i\} - T.C._n \quad (۳-۴۲)$$

در این رابطه $T.C._n$ ، هزینه کل امپراطوری n ام و $N.T.C._n$ نیز، هزینه کل نرمالیزه شده آن امپراطوری می باشد. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره، توسط هر امپراطوری، به صورت رابطه (۳-۴۳) تعریف شده است.

$$P_{p_n} = \frac{N.T.C._n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C._i} \quad (۳-۴۳)$$

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراطوری، برای این که مستعمرات مذکور به صورت تصادفی، ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراطوری، بین امپراطوری ها تقسیم شوند؛ بردار \mathbf{P} از روی مقادیر احتمال فوق، به صورت رابطه (۳-۴۴) تشکیل می شود.

$$\mathbf{P} = [P_{p_1}, P_{p_2}, P_{p_3}, \dots, P_{p_{N_{imp}}}] \quad (44-3)$$

بردار \mathbf{P} دارای سایز $1 \times N_{imp}$ می‌باشد و از مقادیر احتمال تصاحب امپراطوری‌ها تشکیل شده است. سپس بردار تصادفی \mathbf{R} هم‌سایز با بردار \mathbf{P} مطابق رابطه (3-45) تشکیل می‌شود. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ می‌باشند.

$$\mathbf{R} = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}] \quad (45-3)$$

سپس بردار \mathbf{D} به صورت رابطه (3-46) تشکیل می‌شود.

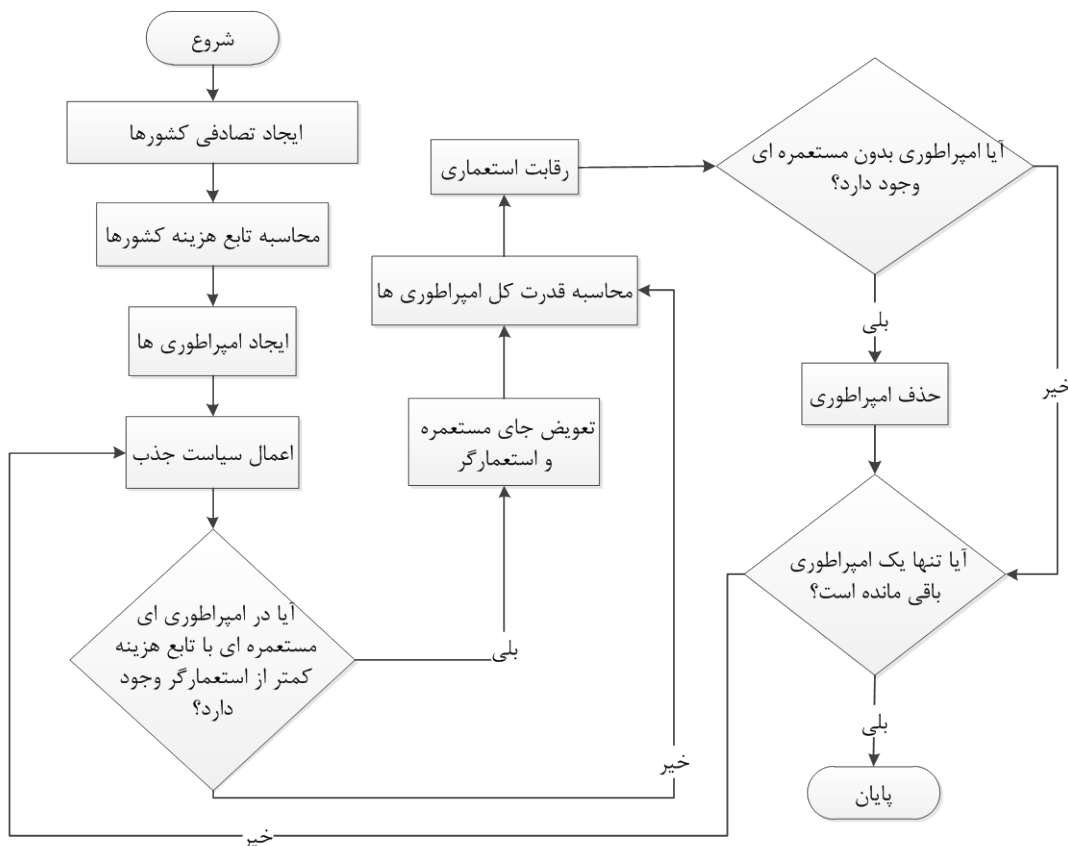
$$\begin{aligned} \mathbf{D} = \mathbf{P} - \mathbf{R} &= [D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}] \quad (46-3) \\ &= [P_{p_1} - r_1, P_{p_2} - r_2, P_{p_3} - r_3, \dots, P_{p_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}}] \end{aligned}$$

با داشتن بردار \mathbf{D} ، مستعمرات مذکور به امپراطوری‌ای تعلق می‌گیرند که اندیس مربوط به آن در بردار \mathbf{D} بزرگ‌تر از بقیه می‌باشد. امپراطوری‌ای که بیشترین احتمال تصاحب را داشته باشد، با احتمال بیشتری اندیس مربوط به آن در بردار \mathbf{D} ، بیشترین مقدار را خواهد داشت گرفته‌اند (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007).

۶- سقوط امپراطوری‌های ضعیف: در این الگوریتم، یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. حذف امپراطوری‌های ضعیف در نهایت منجر به همگرایی الگوریتم می‌شود (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007).

۷- همگرایی: الگوریتم مورد نظر تا برآورده شدن یک شرط همگرایی، و یا تا اتمام تعداد کل تکرارها، ادامه می‌یابد. پس از مدتی، همه امپراطوری‌ها، سقوط کرده و بقیه کشورها تحت کنترل یک امپراطوری واحد، قرار می‌گیرند. در این دنیای ایده‌آل جدید، همه‌ی مستعمرات، توسط یک امپراطوری واحد اداره می‌شوند و موقعیت‌ها و هزینه‌های مستعمرات، برابر با موقعیت و هزینه کشور امپریالیست است. در چنین موقعیتی رقابت امپریالیستی به پایان رسیده و به عنوان یکی از شروط توقف الگوریتم متوقف می‌گردد (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007).

در شکل ۳-۱۰ فلوجارت استاندارد الگوریتم رقابت استعماری نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- فلوجارت استاندارد الگوریتم رقابت استعماری (Atashpaz-gargari, Lucas, 2007)

۳-۴- نتیجه‌گیری

اساساً یک سیستم فازی دانش و آگاهی افراد خبره و اندازه‌گیری‌هایی که از قواعد فیزیکی مشتق شده‌اند را در چهار چوبی مشابه مدل‌های ریاضی فرموله می‌کند. مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی‌ها)، نیز از این ویژگی برخوردارند. بنابراین می‌توان رابطه غیر خطی موجود بین آن‌ها را با استفاده از سیستم‌های فازی فرموله نمود.

طراحی سیستم فازی عبارت است از تعیین پارامترهای مجهول $\bar{x}_i^1, \bar{y}_i^1, \sigma_i^1$ که \bar{x}_i^1 مکان مرکز تابع عضویت لام پارامتر ورودی \bar{a}_m ، \bar{y}_i^1 مکان مرکز تابع عضویت لام پارامتر خروجی و σ_i^1 نشان دهنده میزان بازشدگی تابع عضویت لام پارامتر ورودی \bar{a}_m می‌باشد. روش‌های تعیین این پارامترها عبارتند از روش‌های مبتنی بر گرادیان و روش‌های آزاد از گرادیان. که در این فصل روش آموزش گرادیان نزولی،

از روش‌های مبتنی بر گرادیان و روش‌های بهینه‌ساز الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات از روش‌های آزاد از گرادیان، تشریح شدند.

فصل چهارم

تحلیل برکشی هوشمند خط ۲ مترو کرج

۱-۴- معرفی پروژه خط ۲ مترو کرج

۱-۱-۴- مشخصات عمومی منطقه

کرج با ۱۶۲ کیلومتر مربع وسعت، در ۳۵ کیلومتری غرب تهران و در دامنه جنوبی رشته کوه البرز قرار گرفته است. جلگه پهناور کرج دارای ارتفاع متوسط ۱۳۲۰ متر از سطح دریا می باشد. جمعیت این شهر بر پایه سرشماری سال ۱۳۸۵ برابر با ۱،۳۷۷،۴۵۰ نفر بوده است. کرج پس از تهران بزرگترین شهر مهاجر پذیر ایران است و با توجه به جوان بودن، هم‌اکنون به عنوان یکی از کلان شهرهای جدید کشور به شمار می آید (وبگاه مرکز آمار ایران).

۲-۱-۴- مشخصات عمومی طرح

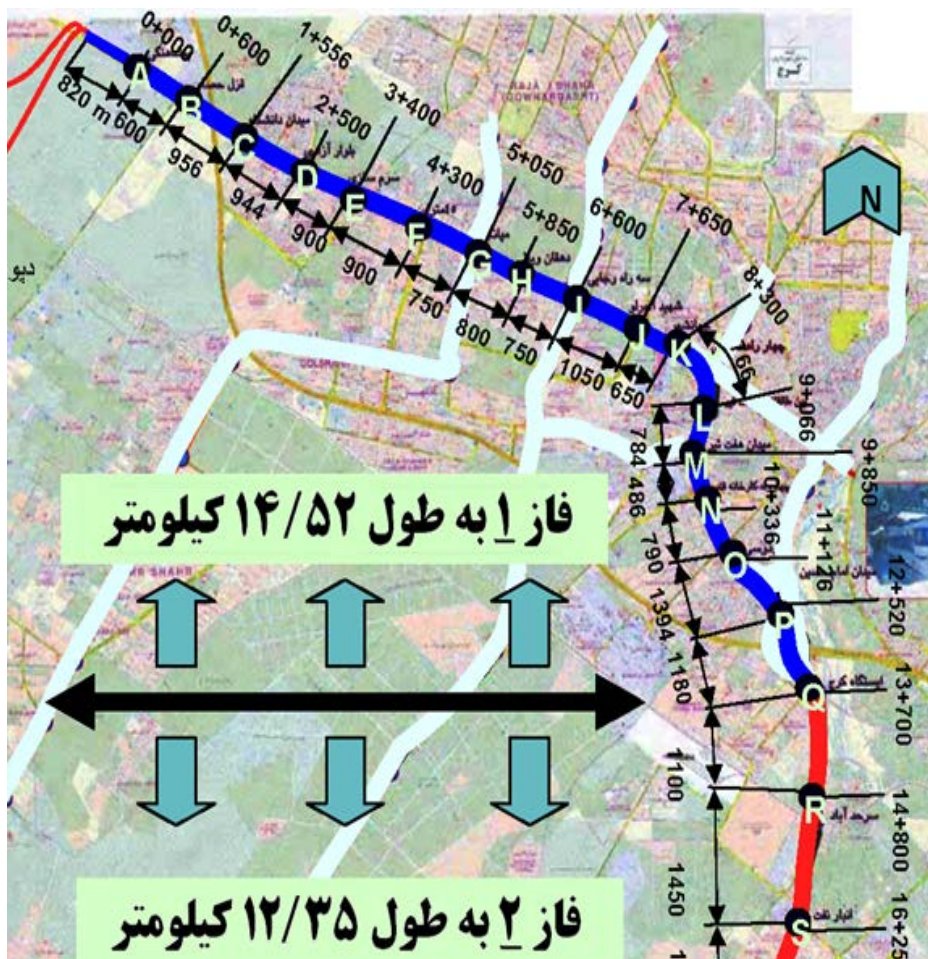
مطالعات و طراحی خط ۲ قطار شهری کرج در سال ۸۳-۸۲ انجام و از اواخر سال ۸۲ نیز عملیات اجرایی آن آغاز شده است. مسیر خط ۲ متروی کرج از منطقه کمال شهر شروع شده و پس از عبور از خیابان شهید بهشتی (قزوین سابق) و طالقانی جنوبی و امتداد تا میدان امام حسین، به سمت ایستگاه متروی کرج- صادقیه گسترش یافته و سپس تا منطقه ملارد ادامه می یابد. این خط به طول ۲۷ کیلومتر می باشد و با ۲۷ ایستگاه سه شهر ملارد، کرج و کمال شهر را سرویس دهی می کند. خط ۲ قطار شهری کرج به طور کامل زیرزمینی است (قطار شهری کرج، ۱۳۸۴).

کارفرمای خط ۲ قطار شهری، سازمان قطار شهری کرج و حومه می باشد که زیر نظر شهرداری کرج فعالیت می کند. مشاور کارفرما (ناظر پروژه) شرکت مهندسی هگزا و پیمان کار پروژه شرکت سابیر

و مشاور پیمان کار شرکت مهتاب قدس می‌باشند. فعالیت‌های مربوط به رفتارسنجی و نصب و قرائت ابزار دقیق توسط شرکت تونل راد تحت نظارت شرکت مهتاب قدس انجام می‌شود.

خط مصوب مذکور در دو فاز مختلف طراحی گشته که شامل:

- فاز یک ۱۴/۵۲ کیلومتر می‌باشد که شاه‌رگ ارتباطی شرقی غربی کرج است و با روش تونل‌زنی اتریشی جدید (NATM) در حال حفاری می‌باشد.
 - فاز دو به طول ۱۲/۳۵ کیلومتر شامل ادامه مسیر از ایستگاه کرج تا سه راه اندیشه می‌باشد که با خرید تجهیزات TBM حفاری در آن ادامه خواهد یافت.
- در شکل ۴-۱-۴ فاز یک و فاز دو مربوط به خط ۲ قطار شهری کرج نشان داده شده است (شرکت مهندسی مهتاب قدس، ۱۳۸۶).



شکل ۴-۱-۴ فازهای حفاری خط ۲ متروی شهری کرج (شرکت مهندسی مهتاب قدس، ۱۳۸۶)

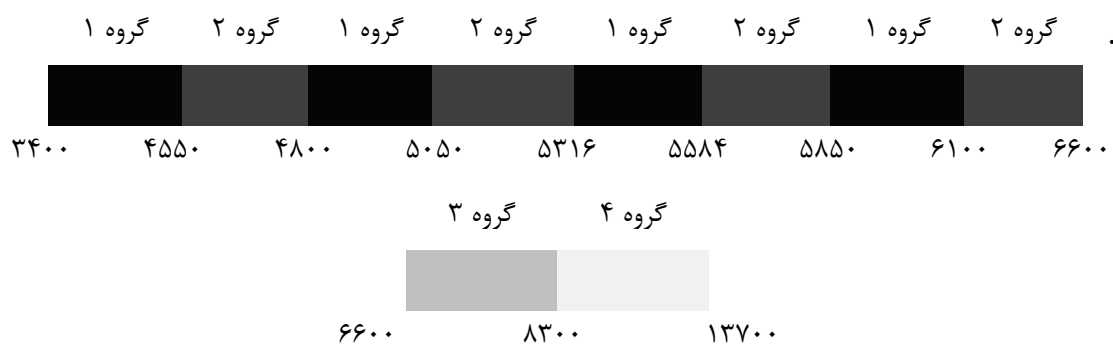
۴-۱-۳- شرایط زمین‌شناسی مهندسی محدوده پروژه

با توجه به نقشه‌های توپوگرافی موجود، محدوده احداث خط ۲ مترو کرج حدوداً در تراز ارتفاعی ۱۳۰۵ متر از سطح دریای آزاد قرار می‌گیرد. همچنین موقعیت جغرافیایی این پروژه حدوداً ۵۰° ، ۳۵° عرض شمالی و $۵۳'$ ، ۵۰° طول شرقی می‌باشد. صرف نظر از تقسیمات زمین‌شناسی و توالی چینه‌شناسی، ویژگی مخروط افکنه‌ها از دیدگاه ژئومورفولوژی مهندسی و رسوب‌شناسی دارای تغییرات تدریجی دانه‌بندی در مسیر شمال به جنوب می‌باشد. تغییرات رژیم آب و هوایی و تکتونیک در طول زمان مستقیماً بر روی وضعیت روان‌آب‌های سطحی و قدرت حمل رسوب گذاری آن‌ها تأثیر گذاشته، و در نتیجه محدوده نهشته شدن خاک‌های درشت دانه و ریزدانه می‌توانند به سمت بالا دست و پایین دست مهاجرت نمایند که حاصل این فرایند می‌تواند به صورت تغییرات ویژگی‌های رسوبات از سطح به عمق نیز نمایان گردد. با توجه به این توضیحات می‌توان پیش‌بینی نمود که قاعدتاً در قسمت شمالی کرج به خصوص شمال شرقی آن، با خاک‌های دانه‌درشت‌تری نسبت به قسمت‌های جنوبی روبرو خواهیم بود که البته با توجه به احتمال تشکیل سرمای موضعی و ایجاد ماندآب‌ها در قسمت‌های درشت دانه شمالی نیز احتمال برخورد با عدسی‌هایی از مصالح ریز دانه وجود دارد. ارتفاعات شمال کرج، پهنه تظاهر سنگ‌های منتسب به سازند کرج و به ویژه سنگ‌های توف سبز می‌باشند که تغذیه کننده اصلی رسوبات دشت کرج محسوب می‌گردند و بخش اعظم قطعات و المان تشکیل دهنده رسوبات آبرفتی گستره شهر کرج اعم از تخته سنگ‌ها، قلوه سنگ‌ها، شن و ریگ‌ها را شامل می‌شوند. از لحاظ کانی‌شناسی فراوان‌ترین کانی توف‌ها در این منطقه در درجه اول کوارتز و بعد فلدسپات می‌باشد (شرکت دریاخاک پی، ۱۳۸۴).

۴-۱-۴- لایه‌های خاک شناسایی شده

با هدف شناخت دقیق وضعیت لایه‌های خاک در محل ساختگاه مورد مطالعه اقدام به حفر ۴۰ حلقه گمانه شناسایی ماشینی و ۱۸ حلقه چاه دستی در محدوده کیلومتر $\frac{۳}{۴}$ الی $\frac{۸}{۳}$ و ۵۰ حلقه

گمانه شناسایی ماشینی و ۱۱ حلقه چاه دستی در محدوده کیلومتر ۸/۳ الی ۱۳/۷ ساختگاه حفر گردیده است. عمق و موقعیت گمانه‌ها با توجه به نوع و شرایط احتمالی تونل و ایستگاه‌ها و وضعیت سازه‌های فعلی و شرایط ترافیکی محدوده ساختگاه برابر با ۳۰ متر انتخاب شده است. عملیات حفاری گمانه‌های ماشینی با دستگاه دورانی و به روش شستشویی^۱ و مغزه‌گیری ممتد^۲ گل انجام گرفته است. در حفاری برخی از گمانه‌ها از بنتونیت استفاده گردیده است و همچنین با توجه به طول گمانه‌ها، قطر حفاری از ۷۶ تا ۱۱۶ میلیمتر متغیر بوده است. در هیچ یک از گمانه‌های حفاری شده تا عمق ۲۵ الی ۳۰ متری سطح آب زیرزمینی مشاهده نگردیده است. با توجه به مشاهدات حین حفاری و نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی، به طور کلی خاک زیر سطحی محدوده مورد بررسی را می‌توان در چهار گروه خاکی طبقه بندی نمود. این چهار گروه خاکی در شکل ۲-۴ بر حسب متر نشان داده شده‌اند (شرکت دریاخاک پی، ۱۳۸۴. شرکت مهندسی مشاور ایران خاک، ۱۳۸۴).



شکل ۲-۴- نمایش گروه‌های خاکی مختلف مسیر حفاری فاز ۱ خط ۲ مترو کرج در فواصل مختلف از مسیر بر حسب متر

۴-۱-۴- تشریح گروه‌های خاک

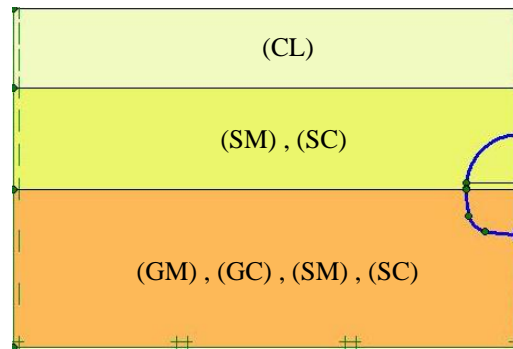
در ادامه گروه‌های خاکی تشریح شده‌اند (شرکت دریاخاک پی، ۱۳۸۴. شرکت مهندسی مشاور ایران خاک، ۱۳۸۴).

۱- گروه خاکی ۱: نحوه قرار گیری لایه‌های تشکیل دهنده گروه خاکی ۱ در شکل ۳-۴ نشان

^۱ - Wash-boring

^۲ - Continous Coring

داده شده است. میزان گام حفاری در این گروه ۶۰ سانتی متر می باشد. همان طور که در شکل ۳-۴ دیده می شود، این گروه متشکل از ۳ لایه می باشد که توصیف خاک هر لایه و ارتفاع آن در جدول ۴-۱ آورده شده است.

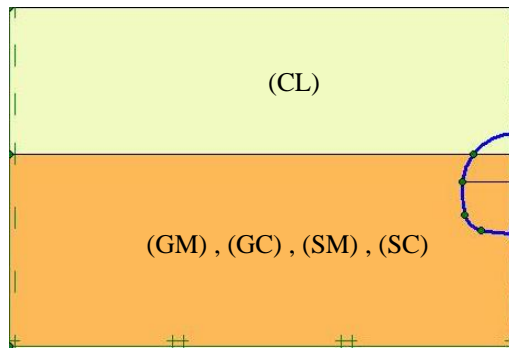


شکل ۳-۴- نمایش وضعیت لایه بندی خاک در گروه خاکی ۱

جدول ۴-۱- توصیف خاک لایه های تشکیل دهنده گروه خاکی ۱ و ارتفاع آن ها

ارتفاع لایه	توصیف خاک	طبقه بندی بر اساس سیستم متحد	گروه ۱
۷	رس کم مایه	(CL)	لایه اول
۹	ماسه رس و لای دار	(SM), (SC)	لایه دوم
۱۴	شن و ماسه رس و لای دار	(GM), (GC), (SM), (SC)	لایه سوم

۲- گروه خاکی ۲: نحوه قرار گیری لایه های تشکیل دهنده گروه خاکی ۲ در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. میزان گام حفاری در این گروه ۸۰ سانتی متر می باشد. همان طور که در شکل ۴-۴ دیده می شود، این گروه متشکل از ۲ لایه می باشد که توصیف خاک هر لایه و ارتفاع آن در جدول ۴-۲ آورده شده است.

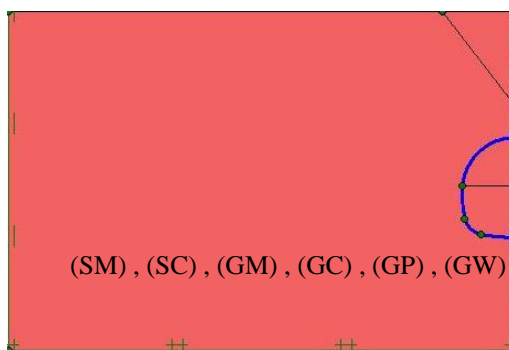


شکل ۴-۴- نمایش وضعیت لایه بندی خاک در گروه خاکی ۲

جدول ۴-۲- توصیف خاک لایه های تشکیل دهنده گروه خاکی ۲ و ارتفاع آنها

ارتفاع لایه	توصیف خاک	طبقه بندی بر اساس سیستم متحد	گروه ۲
۱۳	رس کم مایه	(CL)	لایه اول
۱۷	شن و ماسه رس و لای دار	(GM), (GC), (SM), (SC)	لایه دوم

۳- گروه خاکی ۳: نحوه قرار گیری لایه ی تشکیل دهنده گروه خاکی ۳ در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. میزان گام حفاری در این گروه ۱۲۰ سانتی متر می باشد. همان طور که در شکل ۴-۵ دیده می شود، این گروه متشکل از ۱ لایه می باشد که توصیف خاک و ارتفاع آن در جدول ۴-۳ آورده شده است.



شکل ۴-۵- نمایش وضعیت لایه بندی خاک در گروه خاکی ۳

جدول ۴-۳- توصیف خاک لایه‌ی تشکیل دهنده گروه خاکی ۳ و ارتفاع آن

ارتفاع لایه	توصیف خاک	طبقه بندی بر اساس سیستم متحد	گروه ۳
۳۰	شن و ماسه خوب یا بد دانه بندی شده و رس و لای دار	(SM), (SC), (GM), (GC), (GP), (GW)	لایه اول

۴- گروه خاکی ۴: نحوه قرار گیری لایه‌های تشکیل دهنده گروه خاکی ۴ در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. میزان گام حفاری در این گروه ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. همان طور که در شکل ۴-۶ دیده می‌شود، این گروه متشکل از ۲ لایه می‌باشد که توصیف خاک هر لایه و ارتفاع آن در جدول ۴-۴ آورده شده است.



شکل ۴-۶- نمایش وضعیت لایه‌بندی خاک در گروه خاکی ۴

جدول ۴-۴- توصیف خاک لایه‌های تشکیل دهنده گروه خاکی ۴ و ارتفاع آن‌ها

ارتفاع لایه	توصیف خاک	طبقه بندی بر اساس سیستم متحد	گروه ۴
۱۰	شن با مقدار زیادی رس و لای	(GC), (GM)	لایه اول
۲۰	شن با مقدار زیادی لای	(GM)	لایه دوم

۴-۱-۲-۴- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده گروه‌های خاک

آزمایش‌های شناسایی فیزیکی انجام شده بر روی نمونه‌های خاک عبارتند از:

- آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد (ASTM (D421-85 & D422-63) (D422-87)

(سرندی و همچنین هیدرومتری).

با توجه به نتایج دانه بندی و حدود اتربرگ، طبقه بندی خاک مطابق دستور العمل طبقه بندی متحد (USCS) مشخص گردیده است.

خصوصیات مکانیکی خاک بر اساس نتایج بررسی های زیر به دست آمده اند:

۱. فراسنج های تغییر شکل پذیری خاک

- ضریب ارتجاعی (E_s) و نسبت پواسان خاک (θ) که در محاسبات تغییر شکل های آنی خاک^۱ مورد استفاده قرار می گیرند.

۲. فراسنج های مقاومت برشی خاک

- زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) که در تعیین مقاومت برشی خاک مورد استفاده قرار می گیرند.

متوسط خصوصیات مکانیکی لایه های خاک از نتایج آزمایش های صحرایی درجا و آزمایشگاهی تعیین گردیده است. برای تعیین بازه تغییرات متوسط این فراسنج ها ابتدا کلیه نتایج موجود حاصل از بررسی ها و مطالعات فراسنج مورد نظر در لایه مربوطه و در گمانه های مختلف بررسی گردیده و سپس با در نظر گرفتن تعداد داده های موجود از فراسنج مورد نظر، مقادیر داده ها و پراکندگی آن ها و با استفاده از روش های آماری، متوسط مشخصه فراسنج مربوط، با حداکثر درجه اطمینان قابل قبول (در اینجا ۹۵ درصد) برآورد شده است.

هر یک از فراسنج های مکانیکی ارائه شده، بر اساس آزمایش های ذکر شده در ذیل برآورد شده اند:

- عدد نفوذ استاندارد (N) بر اساس آزمایش نفوذ استاندارد S.P.T.
- ضریب ارتجاعی E_s بر اساس آزمایش های نفوذ استاندارد، بارگذاری صفحه، تحکیم و تک محوری.
- ضریب پواسان (θ) بر اساس خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک.

¹ -Elastic or Immediate Settlement

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) بر اساس آزمایش‌های برش مستقیم، آزمایش نفوذ استاندارد (S.P.T.)، (شرکت دریاخاک پی، ۱۳۸۴. شرکت مهندسين مشاور ايران خاک، ۱۳۸۴).
در جدول ۴-۵ مشخصات فیزیکی لایه‌های شناسایی شده، نشان داده شده است (شرکت دریا-خاک پی، ۱۳۸۴. شرکت مهندسين مشاور ايران خاک، ۱۳۸۴).

جدول ۴-۵- مقادیر و مشخصات لایه‌های خاک مورد مطالعه

(GM)	(GC), (GM)	(SM), (SC), (GM), (GC), (GP), (GW)	(GM), (GC), (SM), (SC)	(SM), (SC)	(CL)	لایه‌های خاک
						مشخصات
>۶۰	>۶۰	>۶۰	۵۳	۴۰	۳۳	عدد نفوذ استاندارد (N) S.P.T.
۸۰	۱۶	۱۰۰	۸۰	۵۰	۴۰	ضریب ارتجاعی E_s (MPa)
۰/۲۷	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	نسبت پواسون ν
۳۳/۵	۳۲	۴۰	۳۶	۳۲	۲۰	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (deg)
۰	۳	۶	۲۵	۳۵	۵۰	چسبندگی (C) (KPa)
۲۱/۶	۲۱	۲۰/۳	۲۰/۴	۲۰/۱	۱۸/۶	وزن مخصوص (γ) (KN/m^3)

در جدول ۴-۵ (CL) معرف رس کم مایه، (SC)، (SM) معرف ماسه رس و لای دار، (GM) معرف شن و ماسه رس و لای دار، (GC)، (SM)، (SC) معرف شن و ماسه رس و لای دار، (GP)، (GC)، (GM)، (SC)، (SM) معرف شن و ماسه خوب یا بد دانه بندی شده و رس و لای دار، (GM)، (GC) معرف شن با مقدار زیادی رس و لای و (GM) معرف شن با مقدار زیادی لای می‌باشد.

۴-۱-۵- روش حفاری تونل

روش حفاری و اجرای تونل خط ۲ متروی کرج با روش جدید اتریشی NATM در دو مرحله حفاری در بخش فوقانی و تحتانی تعیین شده است. در روش جدید تونل سازی اتریشی، اصول رفتار

توده خاک و یا سنگ و رفتار سنجی رفتار حفريات زیرزمینی حین ساخت، با هم تلفیق شده‌اند. درحقیقت *NATM* مجموعه حفاری ویژه و روش نگهداری نیست. بلکه شامل ترکیبی از روش‌های حفاری و تونل‌سازی است، اما تفاوت آن با سایر روش‌ها به کارگیری رفتارسنجی مداوم حین حفاری و کنترل حرکت لایه‌ها و بازنگری سیستم نگهداری برای دستیابی به اقتصادی‌ترین و پایدارترین روش نگهداری است. به هر حال جنبه‌های زیاد دیگری در این روش وجود دارد که آن را نسبت به سایر روش‌ها متمایز می‌سازد و به آن مفهومی فراتر از یک روش می‌بخشد.

اساساً *NATM* یک رهیافت تجربی- علمی است. این روش یک مبنای تئوری نیز دارد و آن ارتباط بین تنش‌ها و تغییرشکل‌های اطراف تونل (معروف به منحنی واکنش زمین) است. در این روش از ابزاربندی دقیق و رفتارسنجی برجا استفاده می‌شود و تغییر و تفسیر اندازه‌گیری‌ها به طور علمی انجام می‌گیرد. مولر^۱ برای مفهوم *NATM*، ۲۲ اصل را مد نظر قرار داده که هفت اصل آن مهم‌تر هستند و بدون آن‌ها *NATM* بی‌معنی است. این اصول هفت‌گانه عبارتند از (مدنی، ۱۳۸۱):

- تحریک مقاومت توده در بر گیرنده

روش *NATM* بر مقاومت ذاتی توده اطراف تونل تأکید دارد که نقش اصلی را در نگهداری تونل ایفا می‌کند. نگهداری اولیه به گونه‌ای طراحی می‌شود که سنگ، خود را نگهداری کند. به همین دلیل، سیستم نگهداری باید مشخصات بار- تغییرشکل مناسبی داشته باشد و در زمان مناسبی نصب شود.

- حفاظت به کمک شاتکریت

به منظور حفظ ظرفیت تحمل بارپذیری توده در برگیرنده، بایستی از سست شدن و تغییرشکل بیش از حد توده در برگیرنده جلوگیری کرد. مهم آن است که سیستم نگهداری در تماس کامل با توده قرار گیرد و همراه با آن تغییرشکل دهد.

- اندازه‌گیری‌ها

¹ Muller

در *NATM* نصب ابزاربندی دقیق در زمان آستربندی اولیه با شاکریت مورد نیاز است تا بتوان تغییرشکل حفريات و بار وارده بر سیستم نگهداری را محاسبه کرد. این امر اطلاعاتی درباره پایداری تونل ارائه می‌دهد.

- سیستم نگهداری انعطاف پذیر

NATM دارای ویژگی تغییر پذیری و انعطاف پذیری می‌باشد که این امر ارائه سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر به جای سیستم صلب را در پی دارد. به بیان دیگر در آن سیستم فعال به سیستم غیر فعال ارجح است.

- کف‌بندی

از آن‌جا که در روش *NATM* تونل به صورت استوانه با دیواره ضخیم احداث می‌شود. اجرای کف‌بندی برای تحمل پذیری حلقه سنگی ضرورت دارد و هیچ بخشی از مقطع حفاری تونل نباید حتی برای مدت کوتاه بدون نصب سیستم نگهداری باقی بماند (Bieniawski, 1984).

- قرارداد پیمانکاری

به علت طبیعت *NATM* در انعطاف پذیری سیستم نگهداری متناسب با وضعیت تونل در مواجهه با وضعیت متغیر زمین، قرارداد پیمانکاری این روش نیز باید به همان اندازه انعطاف پذیر باشد.

۴-۱-۶- نحوه حفاری و خاک برداری در متروی کرج

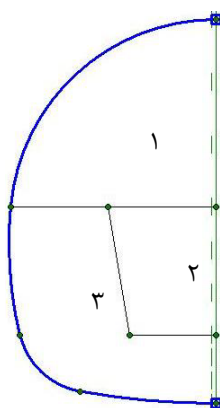
بعد از حفاری نیم مقطع فوقانی در فواصل معینی که بین ۴۰ الی ۳۰۰ متر می‌باشد، مقطع به طور کامل حفاری و نگهداری می‌شود. ایجاد چند پذیرگاه برای خاک باعث تسریع در حفاری می‌شود. بعد از حفاری فوقانی معمولاً نیم مقطع تحتانی را تا ۲ تا ۳ متر از کناره‌ها حفاری می‌کنند که به این بخش ایجاد Box میانی گویند (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶). حفاری به وسیله لودر و بیل مکانیکی یا با استفاده از پیکورهای بادی انجام می‌شود و معمولاً خاک حاصل از حفاری در پذیرگاه ریخته شده و سپس آن را به وسیله لودر و کامیون به خارج از تونل انتقال می‌دهند. گام حفاری بسته به استحکام

از ۰/۵ تا ۱/۵ متر متغیر است.

پس از نگهداری بخش فوقانی و اتمام حفاری فوقانی در تونل، حفاری تحتانی انجام می‌پذیرد که این کار به وسیله بیل مکانیکی انجام می‌شود. ماشین آلات مورد استفاده برای حفاری بر اساس استحکام خاک انتخاب می‌شوند. در شکل ۴-۷ نمایی از مراحل حفاری و در شکل ۴-۸ ترتیب مراحل حفاری نشان داده شده است (شرکت مهتاب قدس، ۱۳۸۶).



شکل ۴-۷- مراحل حفاری تونل، Heading و Benching (شرکت مهندسی مهتاب قدس، ۱۳۸۶)

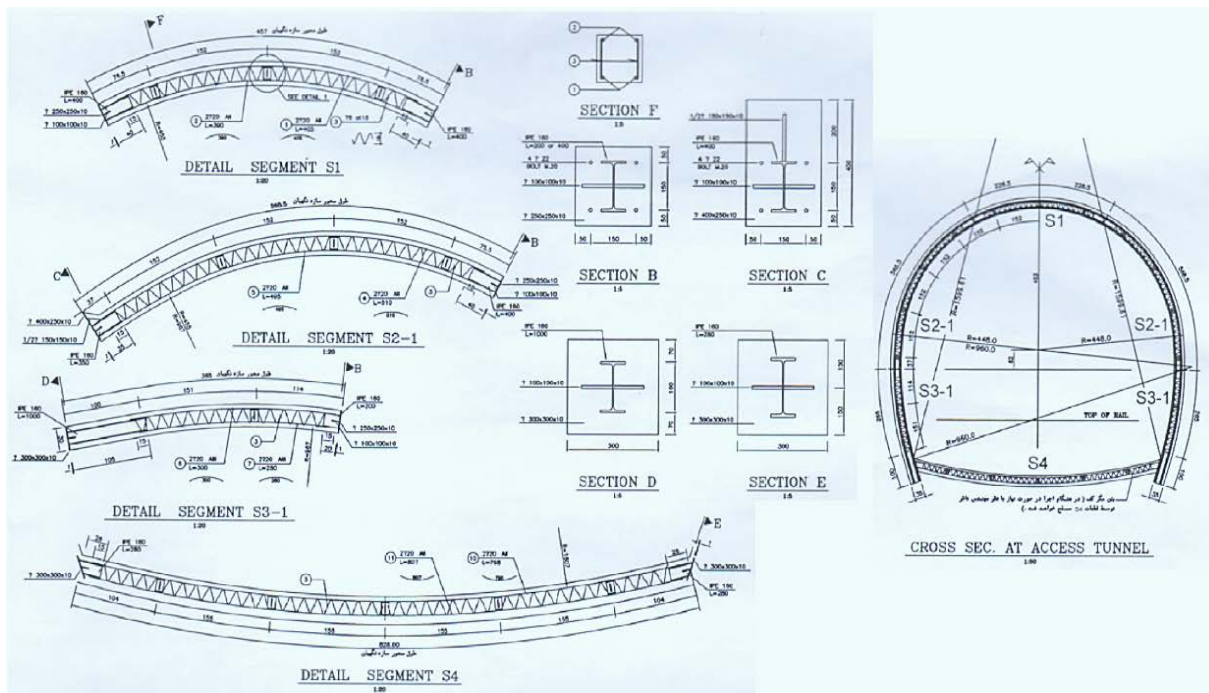


شکل ۴-۸- ترتیب مراحل حفاری تونل در مترو کرج

۷-۱-۴ سیستم نگهداری اولیه در متروی کرج

نگهداری شامل نگهداری اولیه و ثانویه می‌باشد. نگهداری اولیه برای تأمین ایمنی در طول عملیات حفاری نصب می‌شود. در پروژه مورد مطالعه، نگهداری اولیه توسط شاتکریت با الیاف فولادی

انجام می‌شود که با فاصله ۱ الی ۱/۲ متر با توجه به شرایط کار توسط قاب‌های فولادی و یا تیر مشبک^۱ (فرم) تقویت می‌شود. در شکل ۴-۹، شکل و مقاطع سیستم نگهداری و همچنین شکل مقطع تونل نشان داده شده است (شرکت مهندسی هگزا، ۱۳۸۶).



شکل ۴-۹- شکل هندسی و مقاطع فرمها (شرکت مهندسی هگزا، ۱۳۸۶)

نگهداری اولیه در دو بخش فوقانی و تحتانی مطابق سیستم حفاری اجرا می‌شود. پس از حفاری بخش فوقانی ابتدا دو بالشتک در دو طرف مقطع حفر شده قرار می‌دهند، سپس یک لایه مش بر روی دیواره قرار می‌دهند که به اندازه ۱۰ سانتی‌متر از دیواره فاصله داشته باشد. سپس قاب‌های S_2 را بر روی بالشتک قرار می‌دهند و بعد قاب S_1 را در سقف قرار می‌دهند. قاب S_1 در دو سمت به قاب‌های S_2 متصل می‌شود که محل اتصال قاب‌ها را فلنچ گویند. با انجام این مرحله ثابت کردن قاب‌ها به اتمام می‌رسد. در مرحله بعد لایه دوم مش را قرار می‌دهند. مش‌های مرحله دوم باید به اندازه یک خانه با مش‌های کناری هم‌پوشانی داشته و به وسیله سیم مفتولی به هم و به قاب‌ها متصل شوند. سپس

¹ Lattice

شاتکریت به ضخامت ۳۰ الی ۳۵ سانتی متر اعمال می شود (شرکت مهندسی هگزا، ۱۳۸۶).

۹-۱-۸- بررسی نتایج قرائت ابزار نشست سنجی در کیلومتر ۹/۱۵

یکی از مهمترین و حساس ترین عملیات در نقشه برداری اندازه گیری دقیق اختلاف ارتفاع دو یا چند نقطه نسبت به هم است. با استفاده از روش تراز یابی دقیق می توان ارتفاع نقاط اصلی شبکه را به صورت دقیق اندازه گیری کرد تا به عنوان بنچ مارک های^۱ ارتفاعی در عملیات نقشه برداری مورد استفاده واقع شوند (شرکت مهندسی مشاور تونل راد، ۱۳۸۸).

۹-۱-۸-۱- بررسی ایستگاه نشست سنجی (R7-N2-S-9+150)

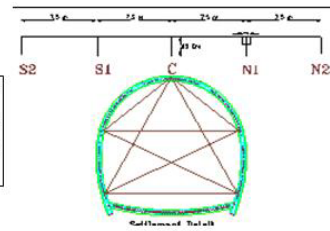
این ایستگاه نشست سنجی در متر از ۹۱۵۰ تونل در جبهه کار شمالی نصب شده است. این ایستگاه در مورخ ۸۷/۱۲/۴ نصب شده و اولین قرائت آن در مورخ ۸۷/۱۲/۱۴ و آخرین قرائت آن در مورخ ۸۸/۰۵/۰۴ انجام گردیده است. تعداد پین های نشست سنجی نصب شده در این ایستگاه سه عدد می باشد و تاکنون ۱۸ دوره قرائت شده است. پین های نشست سنجی این ایستگاه در سطح خیابان نصب شده است. در صورت صرف نظر از خطای قرائت، حداکثر نشست ایجاد شده در این ایستگاه مربوط به پین نصب شده در موقعیت سقف تونل و برابر ۰/۶۰۷ سانتی متر می باشد. با عبور تونل از موقعیت این ایستگاه شیب منحنی نشست - فاصله از جبهه کار افزایش یافته است که این امر نشان دهنده قرار گرفتن ایستگاه در محدوده تنش القائی ناشی از عملیات حفاری تونل می باشد. با فاصله گرفتن ایستگاه از جبهه کار میزان نشست کاهش یافته است (شرکت مهندسی مشاور تونل راد، ۱۳۸۸). نمودار نشست سنجی این ایستگاه در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. در نمودار شکل ۴-۱۱، تاثیر پیشروی سینه کار بر میزان نشست و در نمودار شکل ۴-۱۲، تاثیر زمان بر میزان نشست نشان داده شده است.

¹-Bench Marks

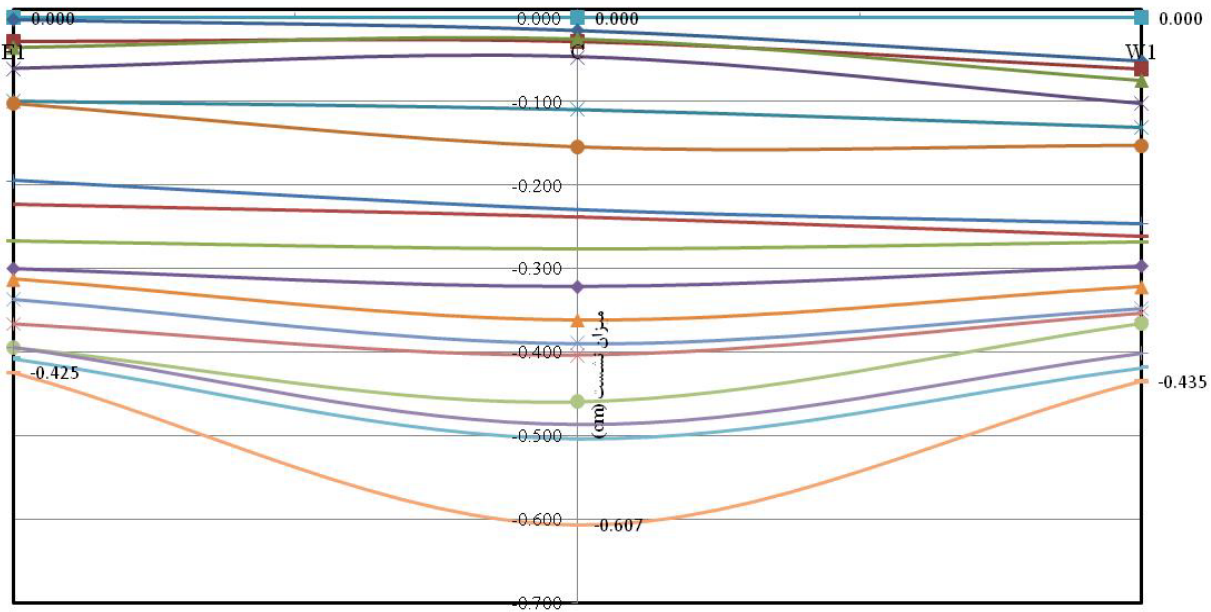


R7-N2-S-9+150

1987/12/14	1987/12/19	1987/12/26	1988/01/06	1988/02/03
1988/02/14	1988/02/20	1988/02/29	1988/03/04	1988/03/12
1988/03/16	1988/03/21	1988/04/03	1988/04/07	1988/04/14
1988/04/18	1988/04/23	1988/05/04		

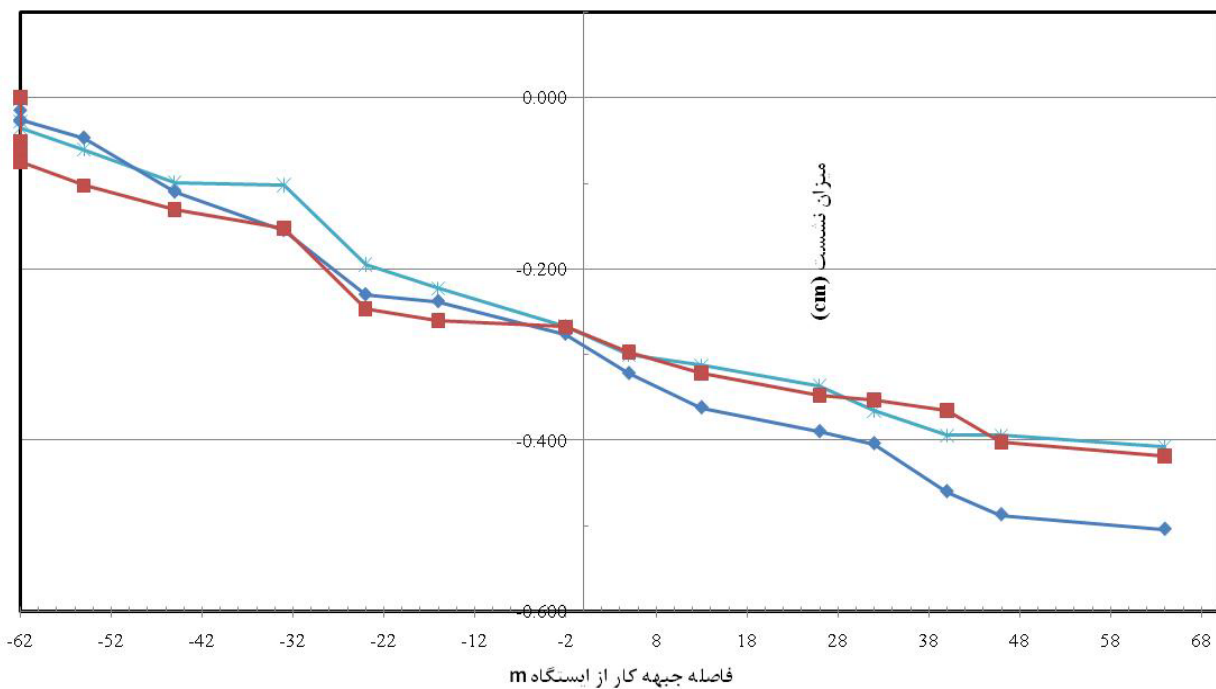


موقعیت نصب بینها نسبت به محور تونل (m)



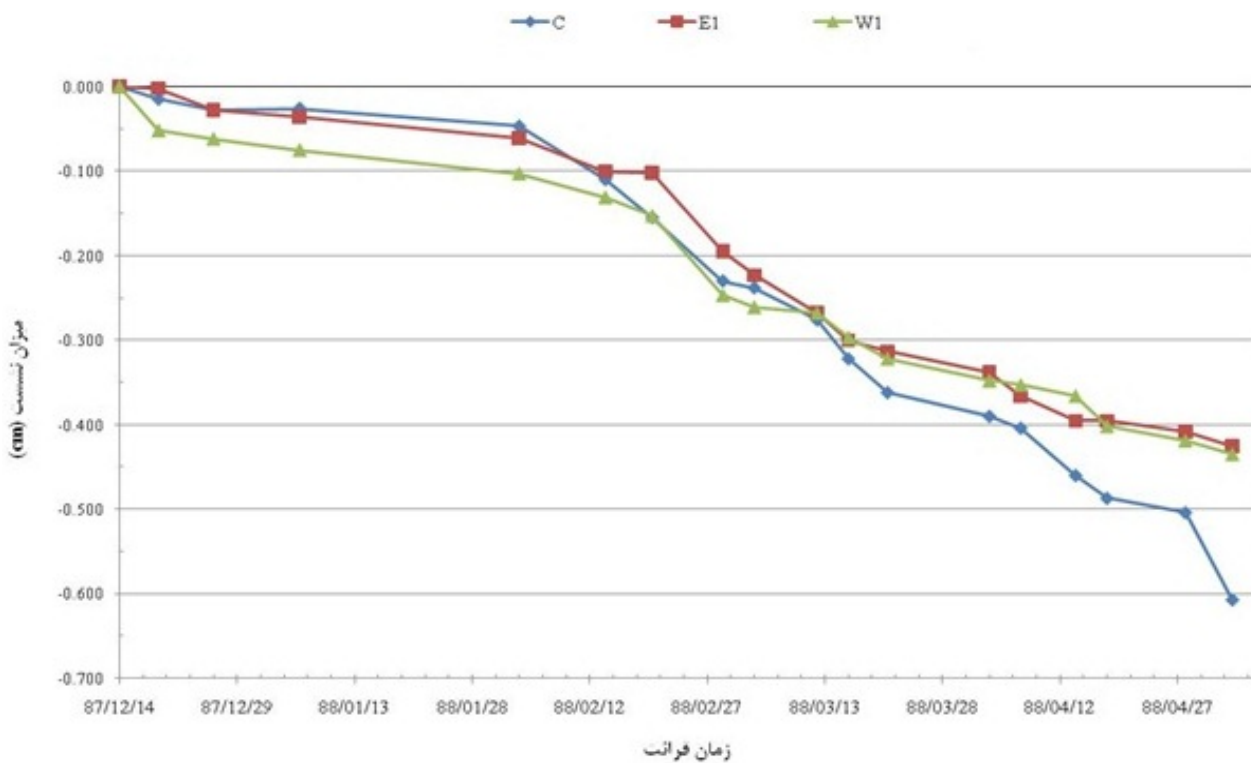
شکل ۴-۱۰- میزان نشست نسبت به زمان قرائت، در ایستگاه (R7-N2-S-9+150) (مهندسین مشاور تونل راد، ۱۳۸۸)

E1 C W1



شکل ۴-۱۱- میزان نشست نسبت به فاصله از جبهه کار در ایستگاه (R7-N2-S-9+150) (مهندسین مشاور تونل راد،

۱۳۸۸)



شکل ۴-۱۲- نشست تجمعی نسبت به زمان قرائت در ایستگاه (R7-N2-S-9+150) (مهندسی مشاور تونل‌راد، ۱۳۸۸)

۲-۴- نشست در اثر حفر تونل

در اثر حفر تونل در نقاط کم‌عمق در زمین‌های سنگی یا غیر سنگی، مخصوصاً در رسوبات آبرفتی سست، جابه‌جایی در محیط ایجاد شده و تغییر شکل‌هایی پدید می‌آید، این جابه‌جایی‌ها را می‌توان به دو مولفه قائم و افقی تجزیه کرد. خساراتی که از حرکات سطح زمین پدید می‌آید، قسمتی از آن به علت مولفه قائم و قسمتی از آن ناشی از مولفه افقی جابه‌جایی در سطح زمین می‌باشد. مولفه قائم سبب پایین آمدن سطح زمین، یعنی نشست تدریجی و مولفه افقی سبب حالت کششی یا فشارشی در سطح زمین می‌شود. این مولفه‌ها می‌توانند تنش‌های جدیدی را بر سازه‌های واقع بر سطح زمین وارد کنند (Brady, 1992).

موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل، تابع عوامل و شرایط اجرایی در ضمن حفر و پس از آن می‌باشد. به طور خلاصه روش حفاری (اعم از دستی یا با استفاده از دستگاه‌های حفاری)، وجود آب زیر زمینی، زمان‌بندی مراحل حفاری، نوع محافظ اولیه و نهایی، ابعاد و شکل مقطع و در مواردی

اجرای تزریق و عوامل دیگر در کنترل نشست سطح زمین نقش دارند که انتخاب بهترین ترکیب از این عوامل می‌تواند اجرای پروژه را با کمترین آسیب و با موفقیت به پایان برساند (Attewell, 1986).

۴-۳- مدل‌سازی تونل پروژه خط ۲ مترو کرج

۴-۳-۱- روش‌های عددی

کاربرد روش‌های عددی در ژئومکانیک را می‌توان به زمان پیدایش روش اجزا محدود در دهه ۵۰ میلادی نسبت داد. به طوری که این نوع از مدل‌سازی به طور موردی در آن سال‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با پیدایش کامپیوترهای سریع روش‌های عددی در ژئومکانیک وارد مرحله‌ی تازه‌ای شدند، به طوری که امروزه متناسب با روش‌های متعدد عددی، برنامه کامپیوتری مرتبط با آن نیز وجود دارد (Huton, 2004). برای مدل‌سازی توده‌سنگ یا خاک روش‌های عددی تحلیل تنش به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱- روش‌های مرزی^۱ یا انتگرالی^۲:

در این روش‌ها، تنها مرز خارجی تونل یا حفریات زیرزمینی به اجزاء کوچکی تقسیم شده و توده‌سنگ از لحاظ ریاضی به عنوان یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می‌شود. متداول‌ترین روش این دسته، روش المان مرزی^۳ است. از آن جا که تعداد المان مرزی که در این روش به کار گرفته می‌شود محدود است لذا به حجم حافظه کامپیوتر کمتری نیاز دارد.

۲- روش‌های محیطی یا دیفرانسیلی^۴:

در این روش‌ها، توده‌سنگی به المان ساده هندسی تفکیک می‌شود که هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند و مجموعه این المان فرعی، رفتار کلی این سنگ را بیان می‌کنند. این گروه شامل روش-

¹ -Boundary Methods

² -Integral

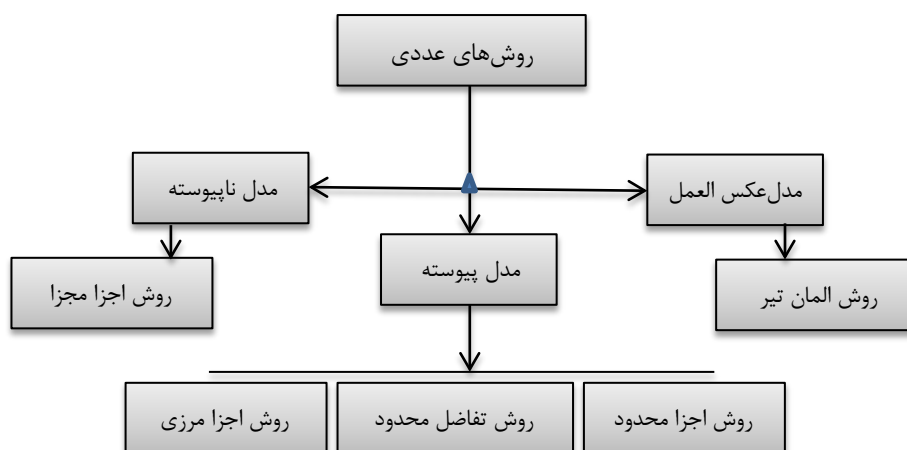
³ -Boundary Element

⁴ -Differential Method

های زیر می باشد:

- روش اجزا محدود^۱
- روش تفاوت های محدود^۲
- روش اجزا مجزا^۳
- روش اجزا مرزی

در دو روش اول، توده سنگی به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می شود، در صورتی که در روش المان مجزا، هر یک از قطعات سنگ را به عنوان عنصر مجزایی مدل سازی می کنند. در روش های محیطی کوشش بسیاری برای ایجاد یک شبکه بندی صورت می پذیرد تا تقسیم بندی توده سنگ به اجزای کوچک به طور بهینه انجام شود. در مورد شبیه سازی های پیچیده مانند آن چه در فضا های متعدد نزدیک به هم وجود دارد شبکه بندی می تواند بسیار مشکل باشد. در حال حاضر با ورود برنامه های رایانه ای که دارای گزینه مش بندی هستند، امکان اجرای شبکه های بسیار بهینه فراهم شده است (قدیری، ۱۳۸۹). در شکل ۴-۱۳، روش های عددی برای مدل سازی توده سنگ و خاک نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳ - انواع روش های عددی (Huton, 2004)

¹ -Finite Element

² -Finite Difference

³ -Distinct Element

در روش اجزا مرزی شرایط روی سطح مرز می‌تواند به موقعیت تمام نقاط در سرتاسر باقیمانده سنگ حتی تا بی‌نهایت مربوط باشد. به عنوان مقایسه، روش اجزا محدود شرایط چند نقطه درون توده‌سنگ را به موقعیت درون ناحیه‌ای بسته‌ای که توسط این نقاط تشکیل شده (المان) مرتبط می‌سازد. روش اجزا محدود برای حل مواردی که با مواد با خواص ناهمگن و غیرخطی ارتباط دارند مناسب است، زیرا هر جزئی رفتار مواد خاص خود را مدل می‌کند (Huton, 2004).

۴-۳-۱-۱- انتخاب مناسب‌ترین روش عددی

هر یک از روش‌های عددی ذکر شده دارای معایب و محاسنی است که بایستی برای هر مورد خاص و برای هدف مطالعاتی موجود بهترین روش ارائه گردد. می‌توان گفت که در بسیاری از موارد مدل‌سازی اهمیت شناخت محیط‌های ناپیوسته و پیوسته تاثیر بسیار زیادی در فرایند شبیه‌سازی مساله خواهد گذاشت. پس لازم است که از فاکتورهایی برای شناسایی انواع محیط‌ها استفاده نماییم. اگر توده‌سنگ کم درزه و دارای حفاری‌های نسبتاً بزرگی باشد، به طوری که تغییرشکل پذیری توده‌سنگ بیش از تغییرشکل پذیری در امتداد درزه‌ها باشد، در چنین حالتی می‌توان مدل را پیوسته فرض نمود و بنابراین فرضیه پیوستگی مناسب خواهد بود. در نتیجه روش تفاضل محدود و روش اجزا محدود مفید واقع خواهد شد. در صورتی که میانگین فاصله داری درزه‌ها مرتبه‌ای از ابعاد حفاری باشد، در چنین حالتی تغییر شکل‌پذیری در امتداد درزه‌ها، بیشتر از تغییرشکل‌پذیری درون بلوک خواهد بود، بنابراین تئوری ناپیوستگی بسیار مناسب خواهد بود (Sinha, 1989). با توجه به این که پروژه مورد مطالعه در توده‌خاک حفاری می‌شود، محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در این پایان‌نامه از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel که بر اساس اجزا محدود به حل مساله می‌پردازد، استفاده شده است.

۴-۳-۲- مدل سازی تونل با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel جهت

محاسبه نشست در سطح زمین

۴-۳-۲-۱- نرم افزار Plaxis 3D Tunnel

نرم افزار Plaxis یک نرم افزار تحلیل عددی است که به روش اجزاء محدود مسائل ژئوتکنیکی را مدل سازی و تحلیل می کند و جهت محاسبه پایداری و تغییر شکل های ایجاد شده در سازه های ژئوتکنیکی به کار می رود. در این برنامه با استفاده از المان محدود دوبعدی و مدل سازی خاک می توان تغییر شکل های الاستوپلاستیک، آنالیز استاتیکی، آنالیز تحکیم و مسائل جریان آب زیرزمینی را مدل کرد. این برنامه قابلیت مدل سازی خاک، عضو سازه ای، اندرکنش بین خاک و سازه و تحلیل سازه های ژئوتکنیکی پیچیده را نیز دارد (Plaxis Tunnel 3D, 2001).

اگرچه نتایج تعداد زیادی از مدل های آزمایشگاهی به نتایج حاصل از تحلیل های این نرم افزار نزدیک بوده است، اما نمی توان اظهار کرد که این برنامه عاری از خطاست. مهم ترین عامل در رسیدن به نتایج دقیق تر و قابل اطمینان از این برنامه آگاهی کاربر از نحوه صحیح مدل سازی، شناخت مدل های مختلف رفتاری و محدودیت های آن، انتخاب مناسب پارامترها و توانایی قضاوت مهندسی کاربر در استفاده از نتایج تحلیل هاست. این نرم افزار از ۴ زیر برنامه تشکیل شده است، که عبارتند از (Plaxis Tunnel 3D, 2001):

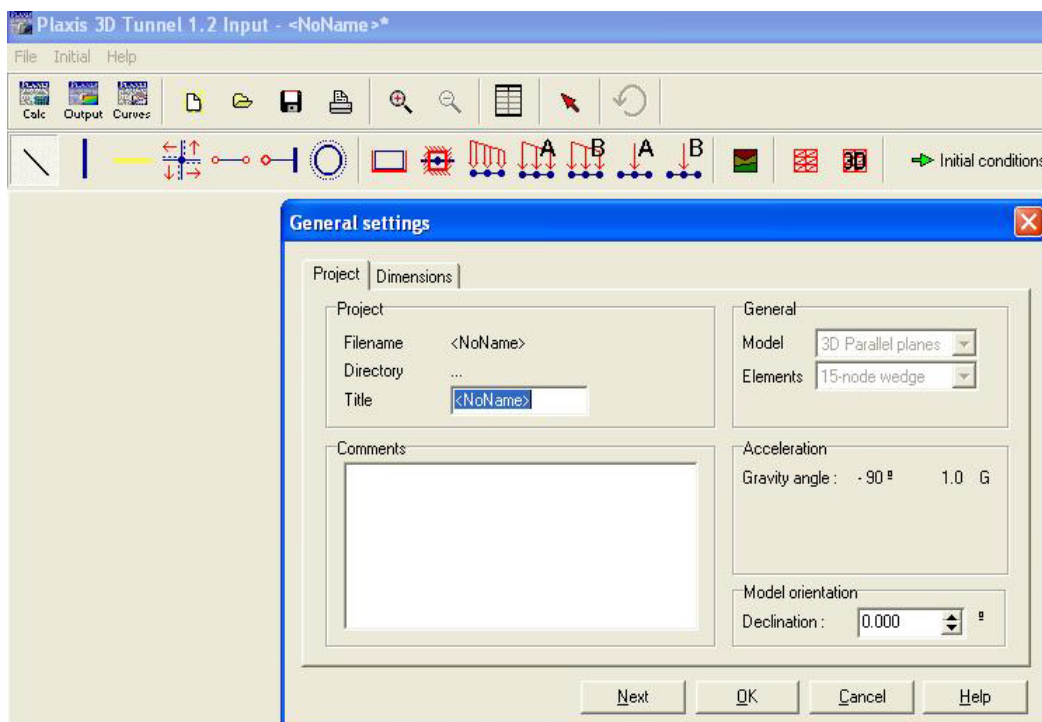
الف) برنامه Input: این برنامه شامل تمام قابلیت های مربوط به رسم و تغییر مدل هندسی، رسم مش بندی المان محدود متناظر آن و ایجاد شرایط اولیه می باشد. ایجاد شرایط اولیه در یک مد^۱ جداگانه در برنامه Input به نام مد شرایط اولیه انجام می شود.

ب) برنامه Calculations: این برنامه شامل قابلیت هایی برای تعریف محاسبات المان محدود اولیه می باشد.

¹ Mode

ج) برنامه Output: این برنامه شامل تمام تسهیلات برای دیدن لیست نتایج ایجاد شده از اطلاعات ورودی و محاسبات المان محدود می‌باشد.

د) برنامه Curves: این برنامه شامل تمام قابلیت‌ها برای ایجاد منحنی‌های بار - تغییر مکان، مسیرهای تنش و دیاگرام‌های تنش - کرنش می‌باشد. در شکل ۴-۱۴ نمایشی از پنجره نخست این نرم افزار نشان داده شده است.



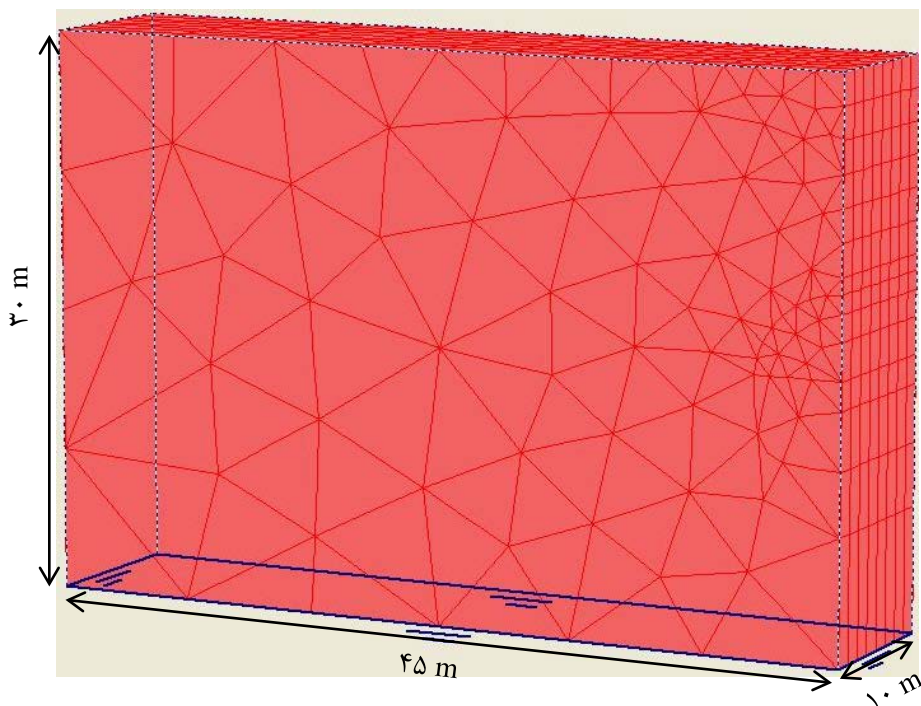
شکل ۴-۱۴ - نمایشی از پنجره نخست نرم افزار Plaxis 3D Tunnel (Plaxis Tunnel 3D, 2001)

به منظور مدل‌سازی مقطع تونل در نرم افزار، لازم است که مقطع به اندازه کافی از دهانه ورودی تونل فاصله داشته باشد تا بتوان فرض صفحه‌ای بودن کرنش را در نظر گرفت. برای حذف اثر اندازه ابعاد مدل بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، ابعاد آن، تا جایی که اثر شرایط مرزی بر روی تعادل اولیه مدل از میان برود، گسترانده شده است.

۴-۳-۲- مراحل مدل‌سازی با توجه به اصول مدل‌سازی عددی و همچنین ترتیب

عملیات اجرایی

۱- انتخاب محدوده مناسبی از زمین اطراف تونل: ایده اولیه در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های پیوسته الاستیک می‌باشد که حداکثر زون تأثیر یک حفره زیر زمینی تا سه برابر قطر آن برآورد شده است. بدین ترتیب در صورتی که زمین به صورت الاستیک رفتار کند، در فاصله سه برابر قطر تونل، تنش‌ها به وضعیت اولیه خود می‌رسند. با توجه به بررسی‌های انجام شده، اگر ابعاد مدل حدود ۸ تا ۱۰ برابر ابعاد حفره باشد، تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطا به حداقل ممکن کاهش خواهد یافت (قدیری، ۱۳۸۹). قطر فضای حفاری مورد بررسی در حدود ۹ متر می‌باشد (شرکت مشاور مهندسی هگزا، ۱۳۸۶) و با توجه به تقارن تونل، نیمی از تونل را مدل می‌کنیم. با شرایط ذکر شده برای ابعاد مدل، عرض مدل ۴۵ متر و ارتفاع مدل نیز با توجه به حداکثر عمق گمانه‌های اکتشافی برابر ۳۰ متر و طول مدل در راستای محور تونل برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. نمایش ۳ بعدی ابعاد مدل در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



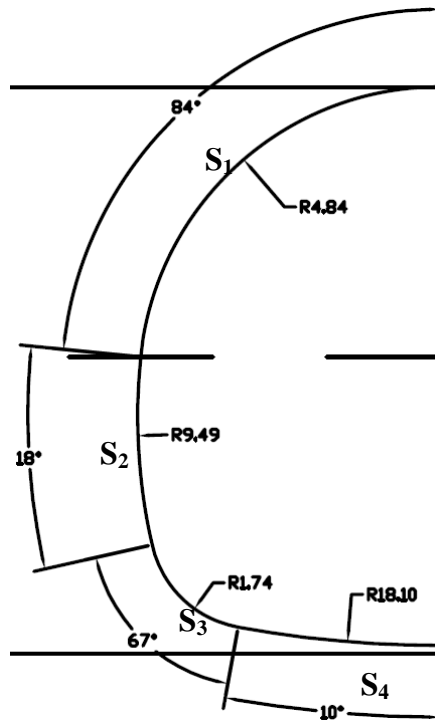
شکل ۴-۱۵- نمایش ۳ بعدی ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل

۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن: مدل‌های رفتاری الاستیک خطی، موهر - کلمب، سنگ درزدار، خاک سخت شونده و خزش خاک نرم در برنامه *Plaxis 3D* موجود می‌باشند که بسته به شرایط مسئله می‌توان از یک یا چند نوع آن‌ها استفاده کرد. یکی از این مدل‌های رفتاری، مدل پلاستیک موهر- کلمب می‌باشد. این مدل نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند. این مدل رفتاری در مکانیک خاک و سنگ، برای حالت پلاستیک، مدل مرسومی می‌باشد (قدیری، ۱۳۸۹). پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر- کلمب عبارتند از: جرم حجمی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت کششی.

۳- ترسیم هندسه مقطع تونل و طراحی نگهداری اولیه: برای مدل کردن نیم مقطع تونل از ۴ کمان (S_4, S_3, S_2, S_1) برای قوس بالایی و دیواره‌ها و همچنین کف تونل استفاده شده است. مشخصات نیم مقطع در شکل ۴-۱۶ و مشخصات کمان‌ها در جدول ۴-۶ آورده شده است (شرکت مهندسی هگزا، ۱۳۸۶).

برای مدل کردن نگهداری اولیه، فرض شده است که نگهداری اولیه توسط یک لایه بتن یک نواخت انجام شده است. پارامترهای این لایه بتنی به نحوی محاسبه شده است که عملکرد یک برش یک متری (در جهت محور تونل و همچنین در صفحه‌ای که محور تونل در آن قرار دارد) از آن، مشابه عملکرد یک برش یک متری (در جهت محور تونل و همچنین در صفحه‌ای که محور تونل در آن قرار دارد) از نگهداری اولیه انجام شده در تونل مفروض باشد.

پارامترهای معادل محاسبه شده برای یک برش یک متری از بتن در جدول ۴-۷ آورده شده است (شرکت مهندسی هگزا، ۱۳۸۶).



شکل ۴-۱۶- مشخصات نیم مقطع تونل (شرکت مهندسی هگزا، ۱۳۸۶)

جدول ۴-۶- مشخصات کمان‌های نیم مقطع تونل

مشخصات کمان	زاویه (deg)	شعاع (m)
S ₁	۸۴	۴/۸۴
S ₂	۱۸	۹/۴۹
S ₃	۶۷	۱/۷۴
S ₄	۱۰	۱۸/۱۰

جدول ۴-۷- پارامترهای معادل محاسبه شده برای برش یک متری از بتن

مشخصات	مکان	کف تونل	دیواره‌های تونل
وزن مخصوص γ (KN/m ³)	۲۳	۲۳	۲۳
ضخامت d (m)	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۳۱۱۵
نسبت پواسون ν	۰/۲	۰/۲	۰/۲

در نرم افزار Plaxis جهت مدل کردن نگهداری از صفحات^۱ استفاده می‌شود که صفحات با استفاده از پارامترهای سختی محوری^۲، صلبیت خمشی^۳، ضریب پواسون و وزن (نیرو بر واحد مساحت) توصیف می‌شوند. در نهایت پارامترهای مورد نیاز برای توصیف نگهداری در نرم افزار Plaxis مطابق جدول ۴-۸ با استفاده از روابط (۴-۱) و (۴-۲) محاسبه شده‌اند (Plaxis Tunnel 3D, 2001).

$$EI = \frac{Ed^3}{12} \quad (4-1)$$

$$EA = Ed \quad (4-2)$$

که در آن‌ها E مدول الاستیسیته و d ضخامت می‌باشد.

جدول ۴-۸- پارامترهای مورد نیاز برای توصیف نگهداری در نرم افزار Plaxis

مشخصات	مکان	کف تونل	دیواره‌های تونل
سختی محوری EA (KNm/m)	۱۳۲۰۰۰۰۰	۸۲۲۳۶۰۰	
صلبیت خمشی EI (KNm ² /m)	۳۹۶۰۰۰	۶۶۴۹۶/۲	

پارامتر وزن نیز برای هر بخش از نگهداری اولیه با توجه به لایه خاک مجاور آن، با استفاده از

رابطه (۴-۳) تعیین شده است (Plaxis Tunnel 3D, 2001).

$$w = (\gamma_{lining}d) - \left(\frac{\gamma_{soil}d}{2}\right) \quad (4-3)$$

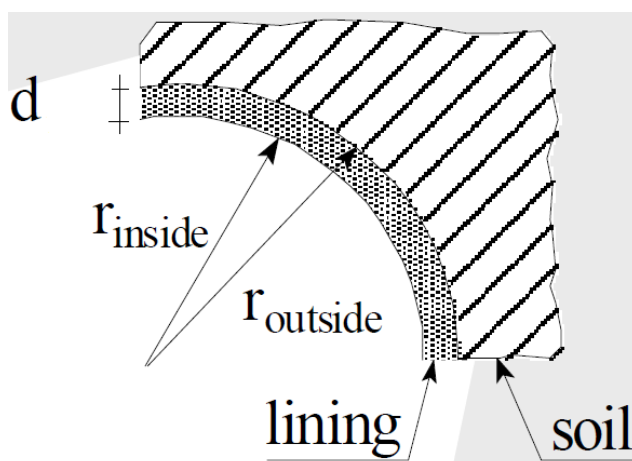
که در آن با توجه به شکل ۴-۱۷، w وزن، γ_{lining} وزن مخصوص نگهداری، d ضخامت و γ_{soil}

وزن مخصوص خاک مجاور نگهداری می‌باشند.

¹ Plates

² Axial stiffness

³ Flexural rigidity



شکل ۴-۱۷- نمایش پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۴-۳) (Plaxis Tunnel 3D, 2001)

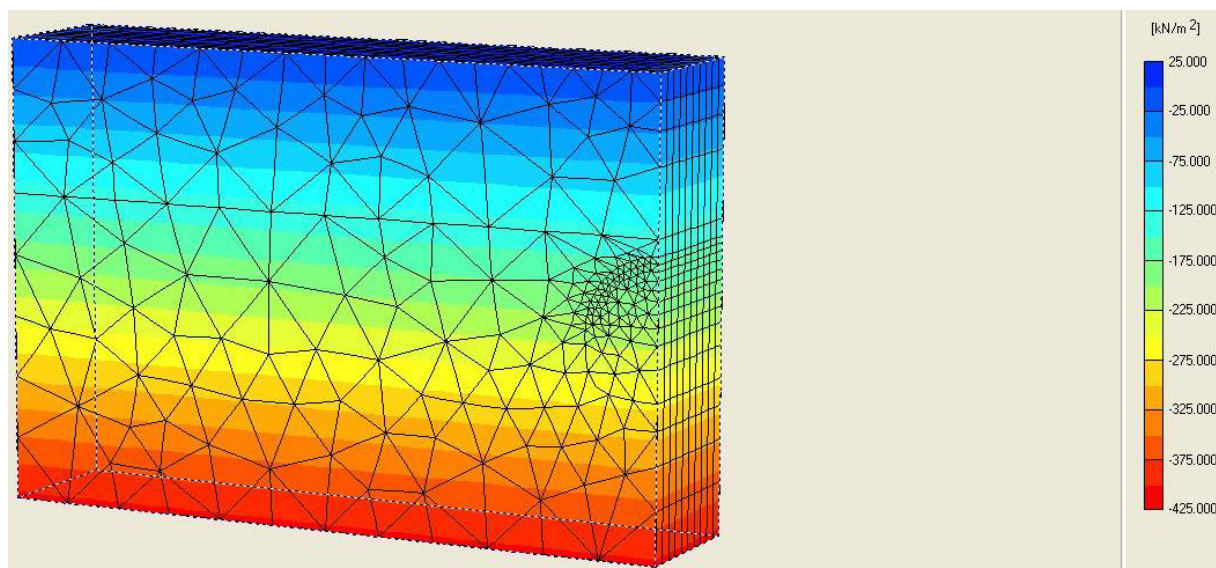
۴- به تعادل رساندن مدل قبل از حفاری: گام اول در حل مدل عددی مطابقت دادن فرآیند، با روند موجود در طبیعت می باشد تا شرایط مدل نزدیک به واقعیت شبیه سازی شود. این عمل برای نشان دادن شرایط تعادل در مدل قبل از حفر تونل ها است. در نتیجه لازم است مدل با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط مرزی و تنش های برجا، قبل از ایجاد حفره تحلیل شود. نرم افزار Plaxis برای محاسبه مقدار نسبت تنش های برجا از رابطه جکی^۱ مطابق رابطه (۴-۴) استفاده می کند که کاربر می تواند در صورت تمایل مقدار نسبت تنش های برجا را تغییر دهد (Plaxis Tunnel 3D, 2001).

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi) \quad (4-4)$$

که در آن k_0 نسبت تنش های برجا و φ زاویه اصطکاک داخلی می باشد.

لازم به ذکر است با توجه به گزارشات ژئوتکنیکی، نسبت تنش افقی به عمودی در منطقه مورد بررسی برابر ۰/۴۵ به دست آمده است (شرکت دریاخاک پی، ۱۳۸۴). شکل ۴-۱۸ وضعیت تنش ها بعد از به تعادل رساندن مدل مربوط به گروه خاکی ۴ را نشان می دهد.

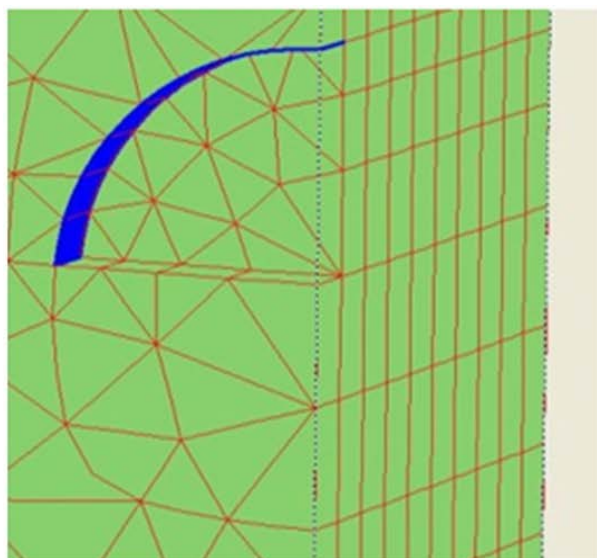
^۱ jaky



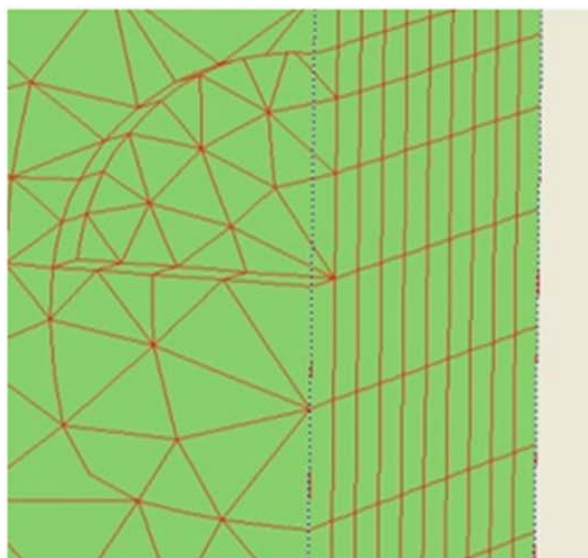
شکل ۴-۱۸- وضعیت تنش‌ها بعد از به تعادل رساندن مدل مربوط به گروه خاکی ۴

۵- حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری، به صورت مرحله به مرحله، تا اتمام حفر تونل و ترخیص کامل تنش و رسیدن به حالت پایدار: حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری، در برنامه Calculations انجام می‌شود. ورودی بارگذاری از نوع ساخت مرحله‌ای^۱ تعریف شده و مراحل حفر تونل و نصب سیستم نگهداری با استفاده از گزینه define به صورت مرحله به مرحله و در فازهای متوالی تعریف شده است. در فاز اول پیشروی به اندازه گام حفاری انجام می‌شود و در فاز دوم نگهداری اولیه مربوط به پیشروی انجام شده در فاز اول نصب می‌شود. در فاز سوم حفاری به اندازه گام حفاری ادامه می‌یابد و در فاز چهارم نگهداری اولیه مربوط به پیشروی انجام شده در فاز سوم نصب می‌شود. این روند تا اتمام حفاری بخش فوقانی تونل ادامه می‌یابد. ۴ فاز متوالی از شروع، ۴ فاز متوالی از پایان حفر بخش فوقانی تونل و وضعیت نهایی پس از اتمام حفر بخش فوقانی تونل در خاک مربوط به گروه ۴ که گام حفاری در آن ۱ متر و شامل ۲۰ فاز ساخت مرحله‌ای می‌باشد، در شکل‌های ۴-۱۹، ۴-۲۰ و ۴-۲۱ نشان داده شده اند.

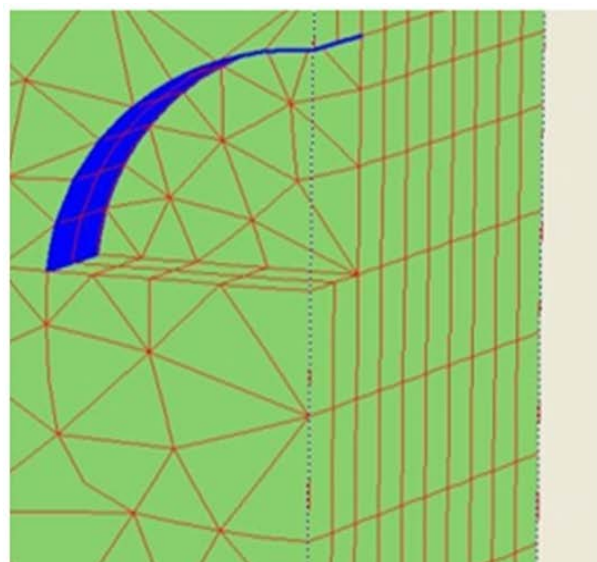
¹ Staged construction



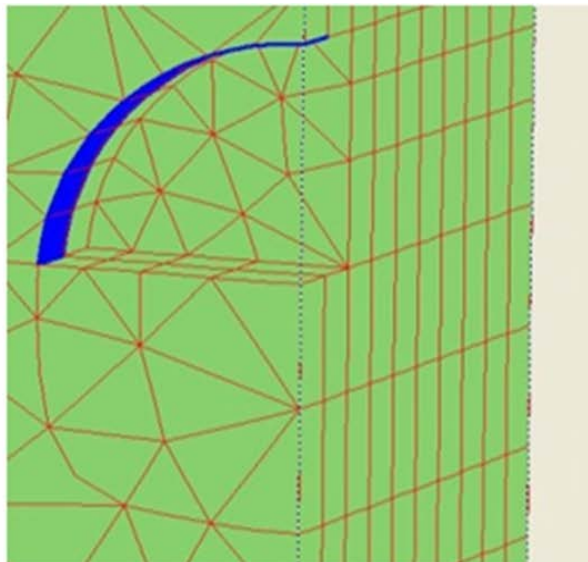
فاز (۲)



فاز (۱)

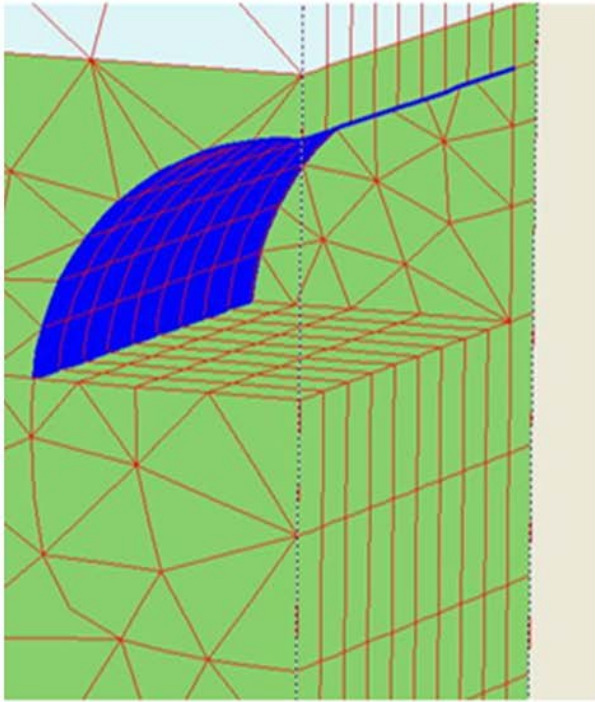


فاز (۴)

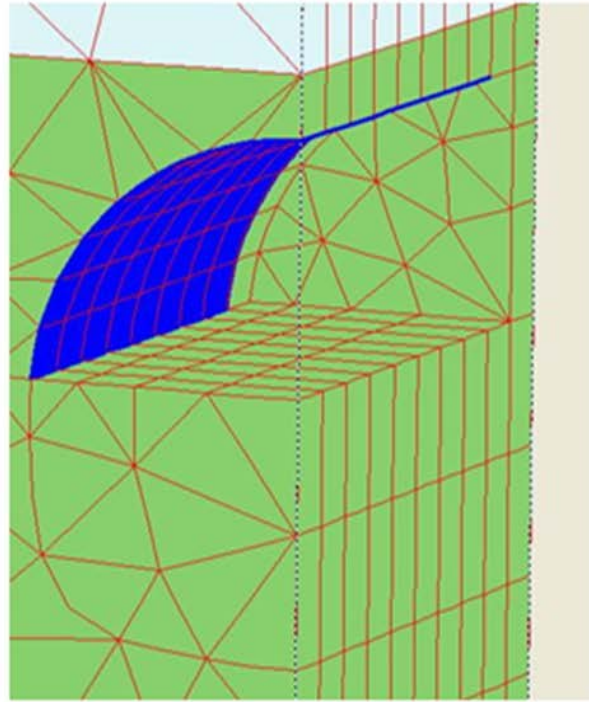


فاز (۳)

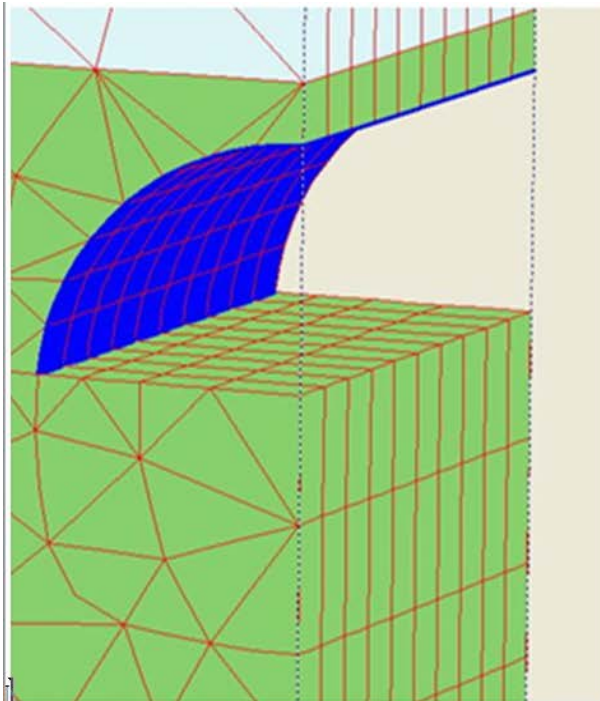
شکل ۴-۱۹- چهار فاز متوالی از شروع حفر بخش فوقانی تونل، در خاک مربوط به گروه ۴ با گام حفاری ۱ متر. در فاز اول پیشروی به اندازه گام حفاری انجام می‌شود و در فاز دوم نگهداری اولیه مربوط به پیشروی انجام شده در فاز اول نصب می‌شود. در فاز سوم حفاری به اندازه گام حفاری ادامه می‌یابد و در فاز چهارم نگهداری اولیه مربوط به پیشروی انجام شده در فاز سوم نصب می‌شود.



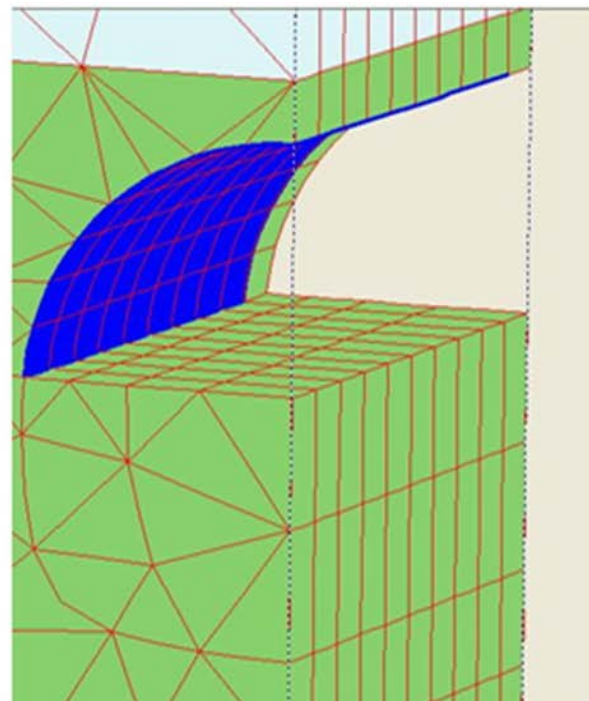
فاز (۱۸)



فاز (۱۷)



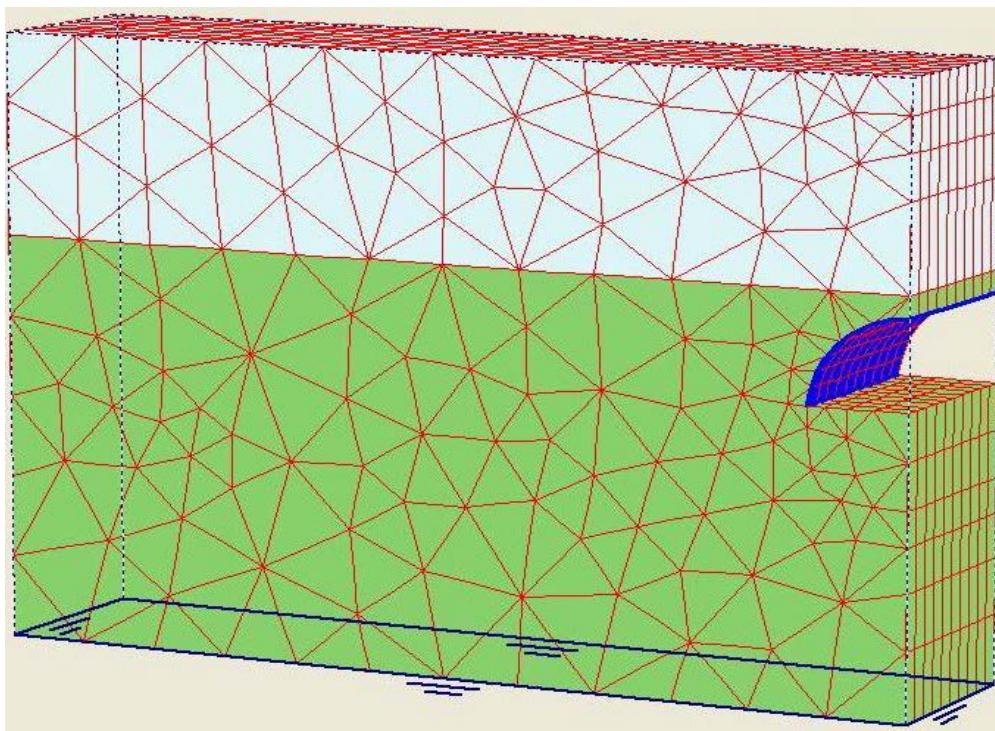
فاز (۲۰)



فاز (۱۹)

شکل ۴-۲۰- چهار فاز متوالی از پایان حفر بخش فوقانی تونل، در خاک مربوط به گروه ۴ با گام حفاری ۱ متر و

۲۰ فاز ساخت مرحله‌ای

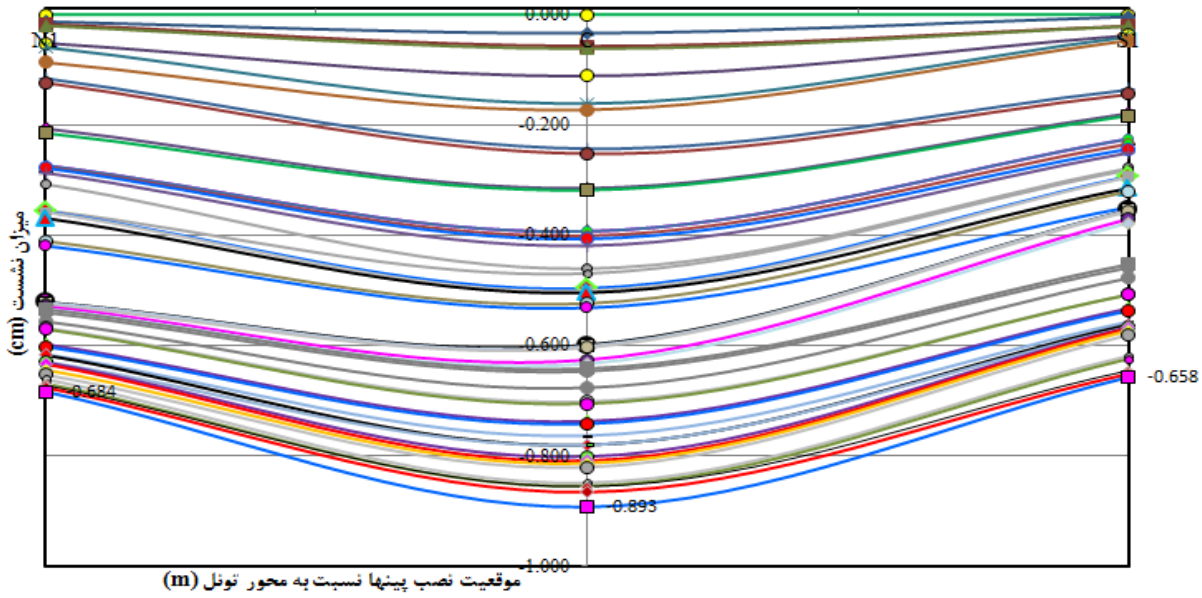
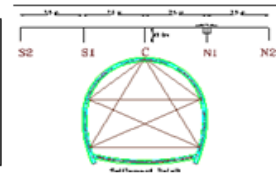
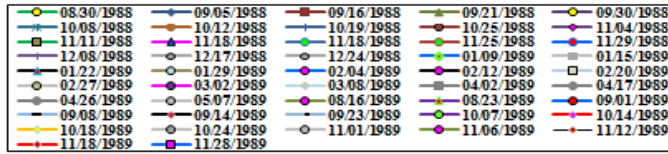


شکل ۴-۲۱- وضعیت نهایی پس از اتمام حفر بخش فوقانی تونل در خاک مربوط به گروه ۴ با گام حفاری ۱ متر

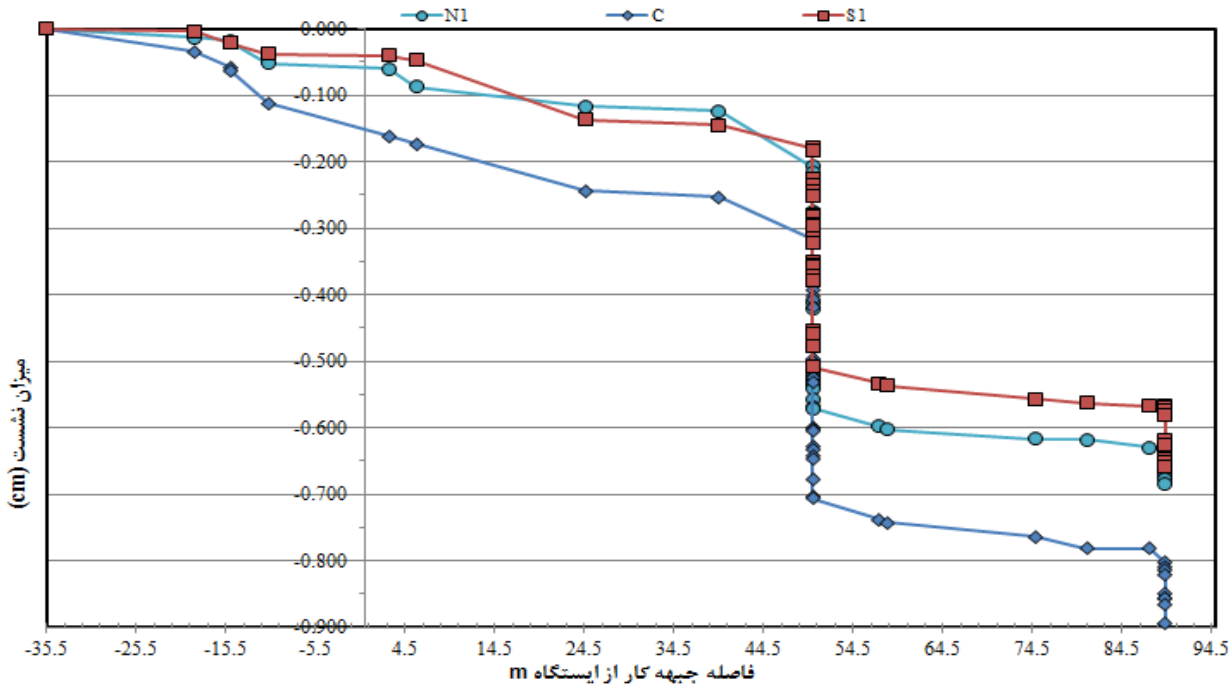
۶- بررسی نتایج عددی (نشست در سطح زمین): با در نظر گرفتن روند پیشرفت حفاری در مترو خط ۲ کرج و با توجه به این که در بخش‌های زیادی از مسیر، بخش تحتانی تونل حفاری نشده است، تنها نشست ناشی از حفاری بخش فوقانی تونل مد نظر قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در پروژه مورد نظر فاصله پیشروی جبهه کار فوقانی و جبهه کار تحتانی بین ۴۰ تا ۱۲۰ متر می‌باشد و زمانی حفاری بخش تحتانی آغاز می‌شود که تونل به تعادل رسیده باشد (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۶). بنابراین آخرین قرائت‌های ثبت شده پس از حفر بخش فوقانی و قبل از آغاز حفاری بخش تحتانی، نشان دهنده حداکثر نشست ناشی از حفر بخش فوقانی بوده و قابل مقایسه با نتایج حاصل از مدل کردن حفر بخش فوقانی در نرم افزار Plaxis می‌باشند. برای بررسی این موضوع، وضعیت ایستگاه R8- E5-S-11+950 مورد بررسی قرار گرفته و نمودار نشست سنجی این ایستگاه در شکل ۴-۲۲ و در نمودار شکل ۴-۲۳ تاثیر پیشروی سینه کار و در نمودار شکل ۴-۲۴ تاثیر زمان بر میزان نشست نشان داده شده است.



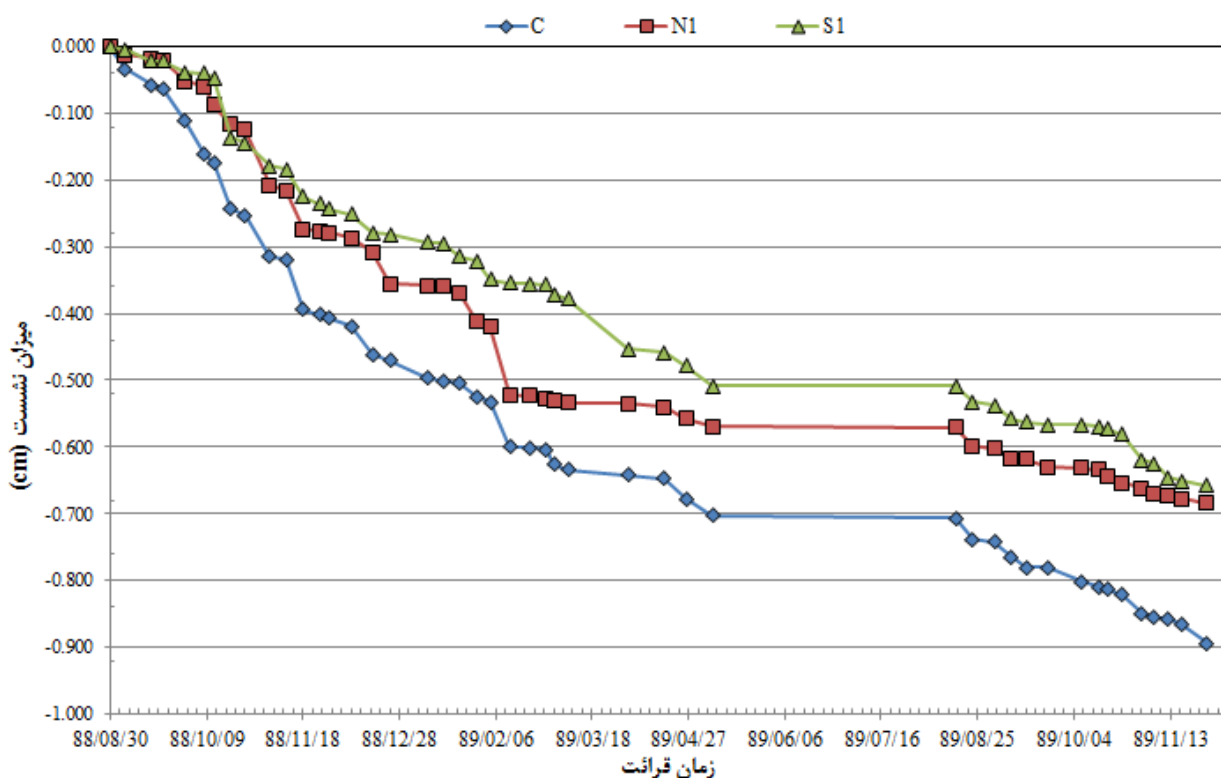
R8-E5-S-11+950



شکل ۴-۲۲- نمودار نشست سنجی ایستگاه (R8-E5-S-11+950) (مهندسی مشاور تونل راد، ۱۳۸۸)



شکل ۴-۲۳- نمودار تاثیر پیشروی سینه کار بر میزان نشست در ایستگاه (R8-E5-S-11+950) (مهندسی مشاور تونل راد، ۱۳۸۸)

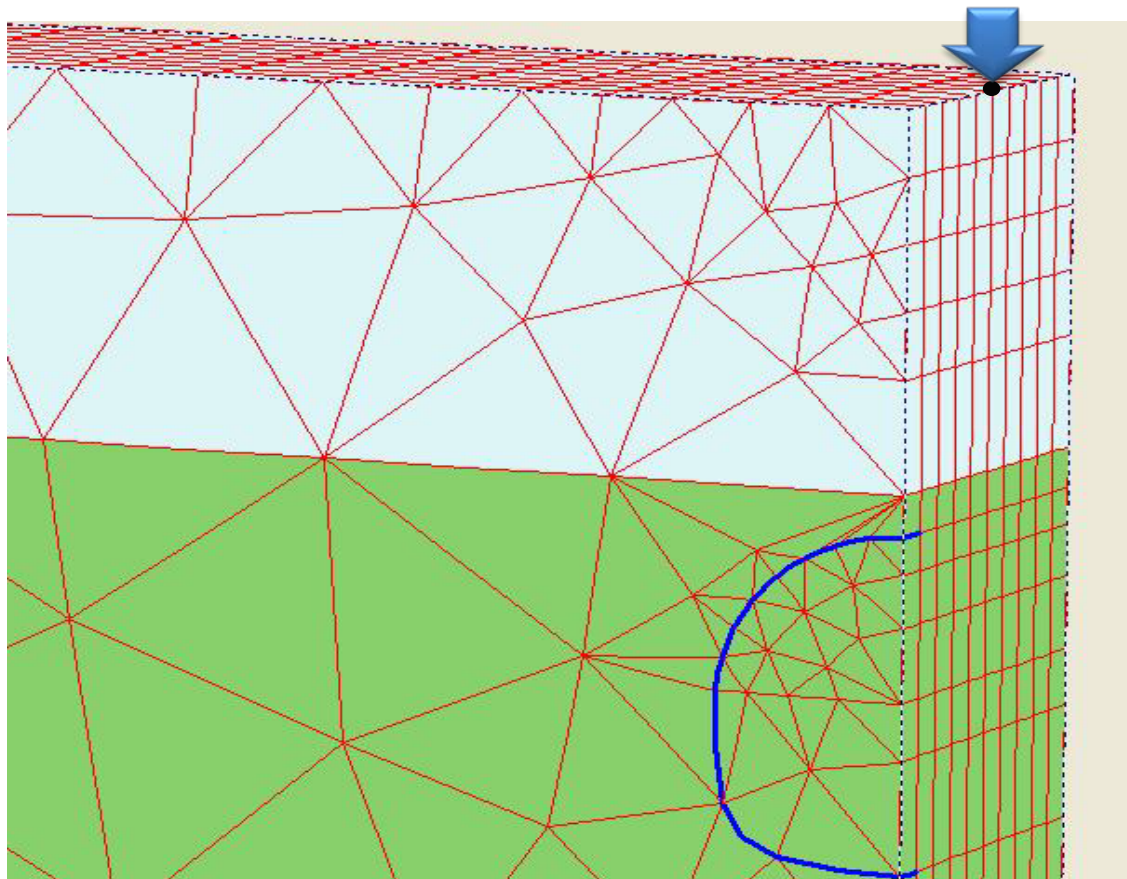


شکل ۴-۲۴- نمودار تاثیر زمان بر میزان نشست در ایستگاه (R8-E5-S-11+950) (مهندسين مشاور تونل راد،

(۱۳۸۸)

به دلیل عبور جبهه کار تحتانی تونل از زیر ایستگاه، نشست ثبت شده در این ایستگاه از دو مرحله مجزا تشکیل شده است. با توجه به نمودارها مرحله‌ی اول نشست ناشی از حفاری بخش فوقانی تونل می‌باشد، که در عدد ۷ میلی‌متر به تعادل رسیده است و مرحله دوم نشست نیز ناشی از حفاری بخش تحتانی تونل بوده که تا زمان برداشت آخرین قرائت نشست سنجی به تعادل نرسیده است.

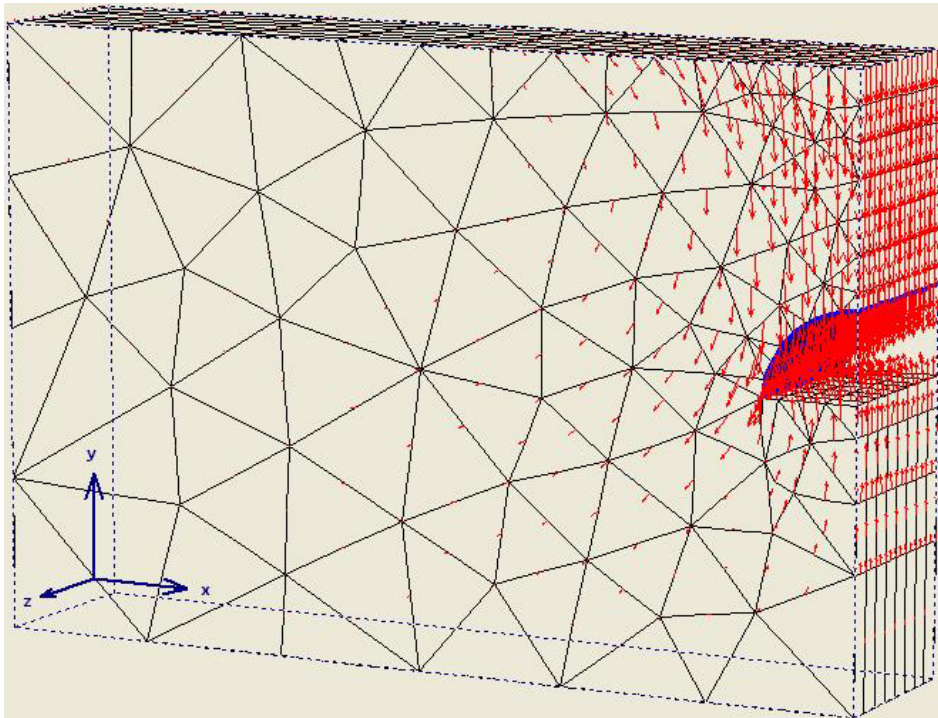
در نرم افزار Plaxis این امکان وجود دارد که در صورت در نظر گرفتن یک نقطه مشخص از محیط قبل از اعمال حفاری تونل، نمودارهای بار - جابه‌جایی و تنش - کرنش در نقطه مورد نظر را، بعد از حفر تونل مشاهده نمود. با توجه به اینکه هدف ما محاسبه نشست در سطح زمین می‌باشد، نقطه واقع در سطح زمین و بالای مرکز قوس تونل و واقع در وسط طول مدل در راستای محور تونل، قبل از اعمال حفاری تونل، به نرم افزار معرفی شده است. این نقطه در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است.



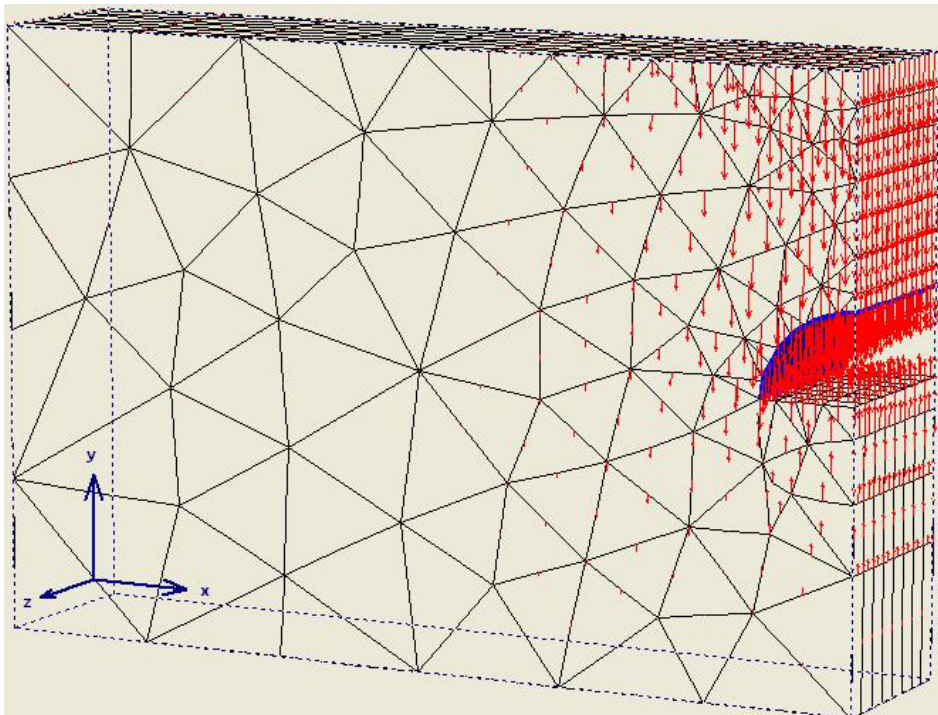
شکل ۴-۲۵- نمایش نقطه در نظر گرفته شده برای بررسی نشست

بعد از اتمام مرحله حفاری تونل، و با استفاده از زیر برنامه Curves نمودارهای مربوط به جابجایی نقطه مذکور به دست آمده است.

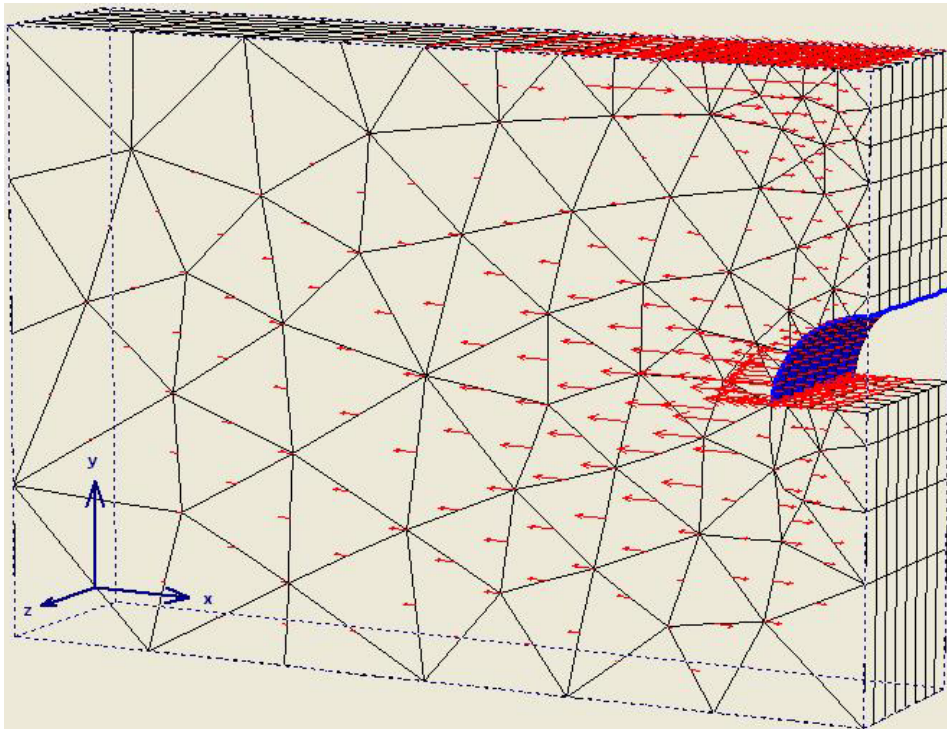
با استفاده از زیر برنامه Output، نمایش‌های گرافیکی مربوط به جابجایی‌های کل، جابجایی‌های قائم، جابجایی‌های افقی در راستای محور تونل، کرنش‌های حجمی کل، کرنش‌های برشی کل و تنش‌های متوسط مدل مربوط به گروه خاکی ۳ بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل، به دست آمده و در شکل‌های ۴-۲۶ تا ۴-۳۱ نشان داده شده‌اند.



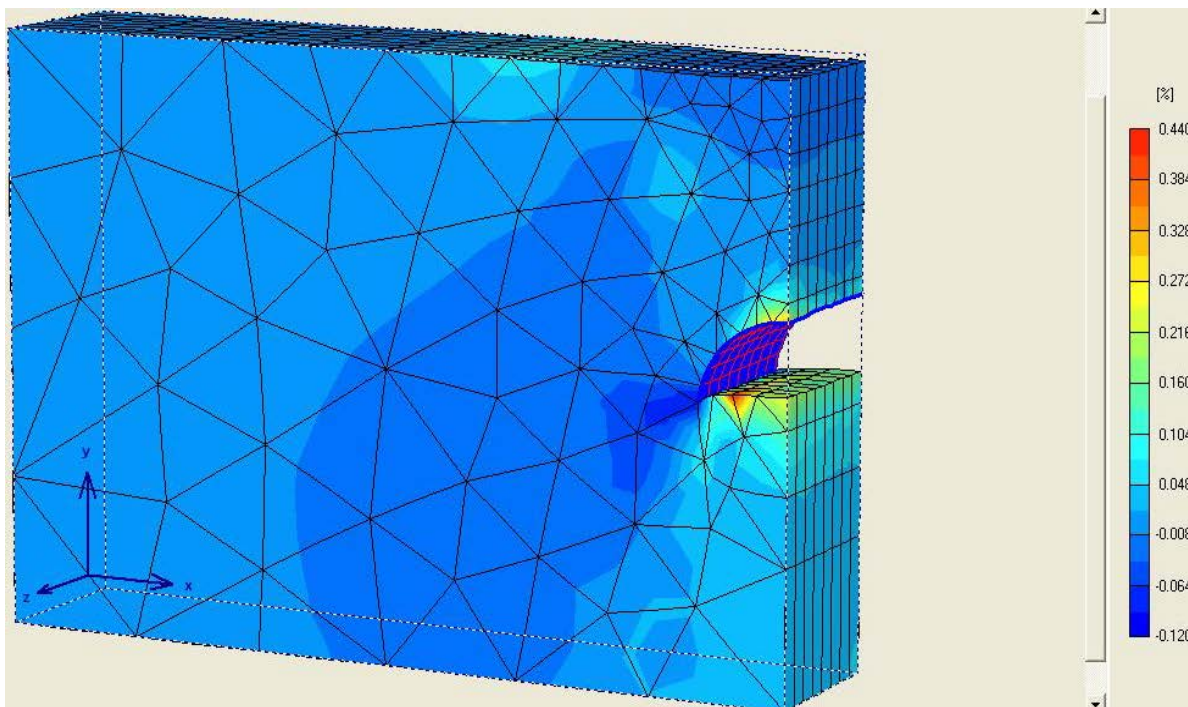
شکل ۴-۲۶- نمایش گرافیکی جابه‌جایی‌های کل بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل (جابه‌جایی‌ها با ۱۰۰ برابر بزرگ‌نمایی نشان داده شده‌اند)



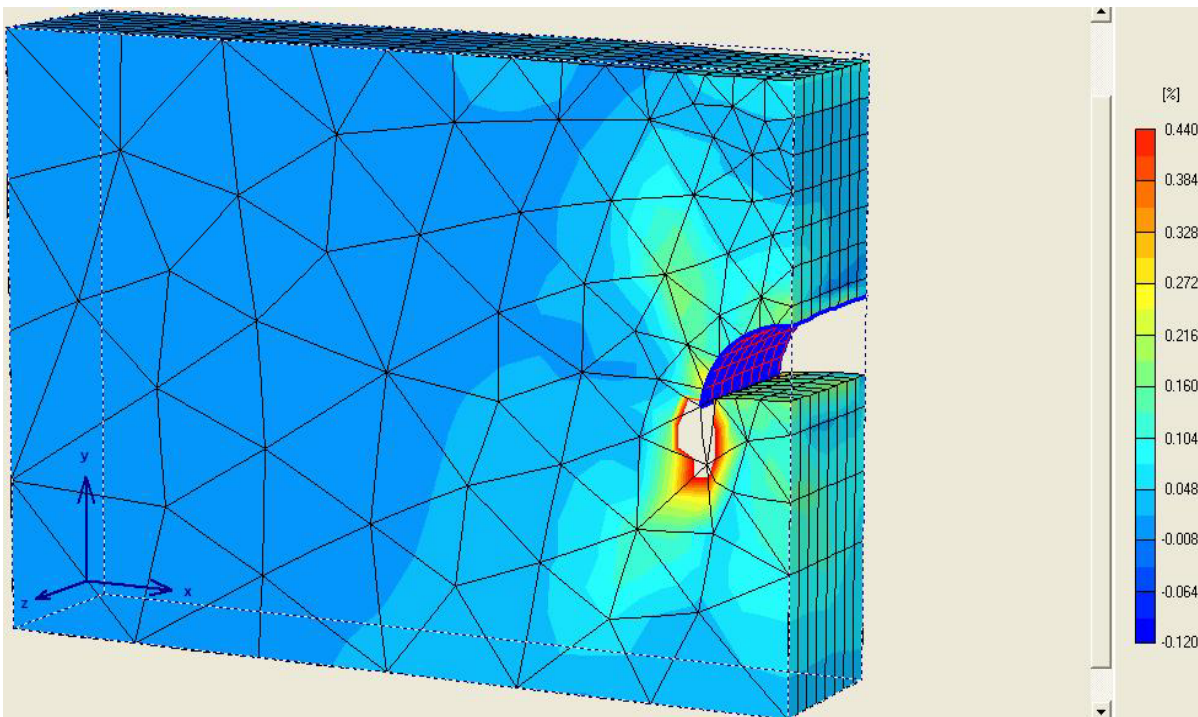
شکل ۴-۲۷- نمایش گرافیکی جابه‌جایی‌های قائم بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل (جابه‌جایی‌ها با ۱۰۰ برابر بزرگ‌نمایی نشان داده شده‌اند)



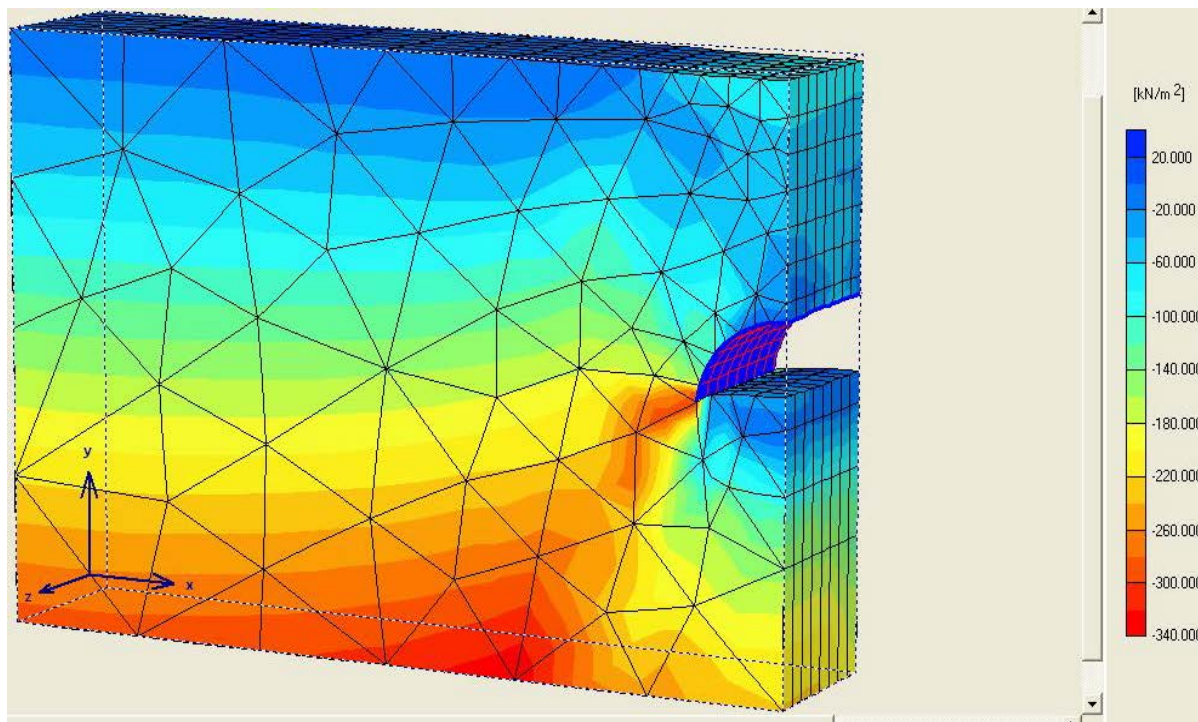
شکل ۴-۲۸- نمایش گرافیکی جابه‌جایی‌های افقی در راستای محور تونل بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل (جابه‌جایی‌ها با ۱۰۰ برابر بزرگ‌نمایی نشان داده شده‌اند)



شکل ۴-۲۹- نمایش گرافیکی کرنش‌های حجمی کل بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل



شکل ۴-۳۰- نمایش گرافیکی کرنش‌های برشی کل بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل



شکل ۴-۳۱- نمایش گرافیکی تنش‌های متوسط بعد از اتمام حفاری بخش فوقانی تونل

۴-۴- طراحی سیستم‌های فازی برای تحلیل برگشتی هوشمند

تحلیل برگشتی هوشمند روشی است برای تعیین رابطه غیر خطی موجود بین مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی‌ها) توسط سیستم‌های هوشمند که بدین منظور از اطلاعات جمع‌آوری شده در منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود. سپس از رابطه غیر خطی حاصل، برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی معادل با جابه‌جایی‌های ثبت شده در رفتار سنجی استفاده می‌شود.

اساساً یک سیستم فازی دانش و آگاهی افراد خبره و اندازه‌گیری‌هایی که از قواعد فیزیکی مشتق شده‌اند را در چهار چوبی مشابه مدل‌های ریاضی فرموله می‌کند. مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی‌ها)، نیز از این ویژگی برخوردارند. بنابراین می‌توان رابطه غیر خطی موجود بین آن‌ها را با استفاده از سیستم‌های فازی فرموله نمود.

۴-۴-۱- تعیین پارامترهای ورودی سیستم‌های فازی برای تحلیل برگشتی

هوشمند

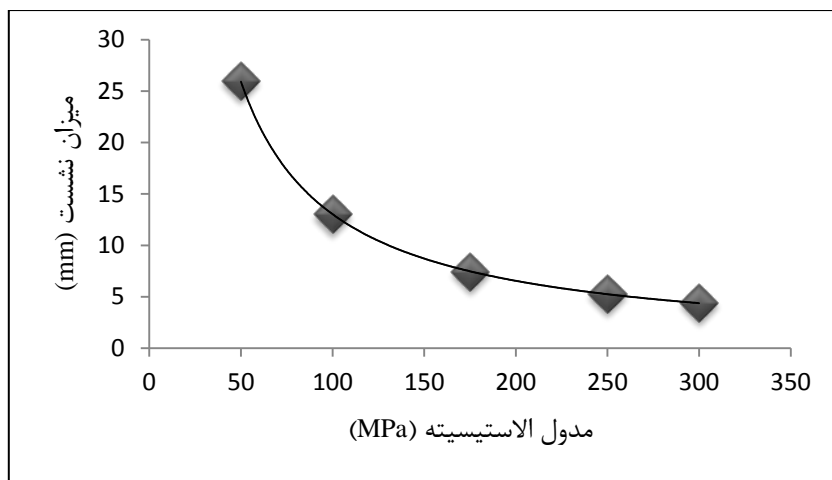
برای طراحی سیستم فازی مورد نظر در این مطالعه، ورودی‌های سیستم عبارتند از شماره گروه خاکی، خصوصیات توده‌خاک و شرایط تنش منطقه، که عبارتند از:

- مدول الاستیسیته
- نسبت پواسون
- زاویه اصطکاک داخلی
- چسبندگی
- نسبت تنش‌ها
- شماره گروه خاکی

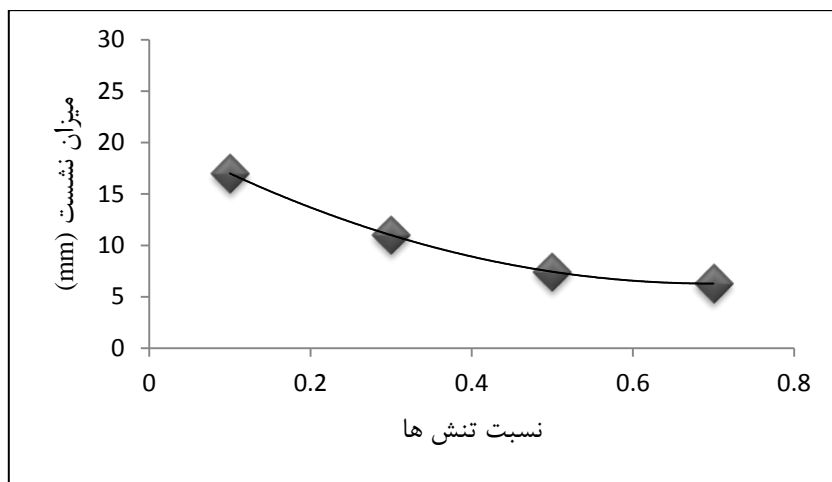
خروجی معادل با ورودی‌های فوق برای سیستم فازی، عبارت است از، نشست در نقطه واقع در سطح زمین و بالای مرکز قوس تونل و واقع در وسط طول مدل در راستای محور تونل (شکل ۴-۲۵). هرچه تعداد متغیرهای ورودی سیستم بیشتر باشد، به مجموعه آموزشی وسیع‌تری نیاز است تا سیستم بتواند الگوی بهتری را تشخیص دهد. زمان لازم برای آموزش سیستم تابعی از تعداد متغیرهای آموزشی می‌باشد و هر چه تعداد متغیرهای ورودی بیشتر باشد، زمان افزایش می‌یابد. در چنین مواردی حذف متغیرهایی که اثر مثبت و معنی داری در پیش‌بینی سیستم ندارند، نقش بسزایی در افزایش سرعت دارد (قیاسی‌فریز، ۱۳۸۹). هم‌چنین برای اطمینان از یکتایی جواب‌ها در تحلیل برگشتی و افزایش سرعت تحلیل، پارامترهایی بایستی شناسایی شوند که دارای شرایط زیر باشند (Zhang, et al, 2006).

- پارامترهای انتخاب شده اثر بیشتری بر روی پایداری فضاهاى احداث شده داشته باشند.
 - پارامترهایی انتخاب شوند که به دست آوردن آنها از طریق روش‌های دیگر مشکل باشد.
 - تعداد پارامترهای مجهولی که به راحتی شناسایی می‌گردند، کاهش پیدا نمایند.
- در تحلیل برگشتی پارامترهایی که بیشترین تغییرات را به وجود می‌آورند انتخاب می‌شوند. از طرفی تعداد آزمایش‌های انجام شده و میزان اعتماد به نتایج آنها در انتخاب پارامترهای مجهول تاثیر خواهد داشت (Zhang, et al, 2006).

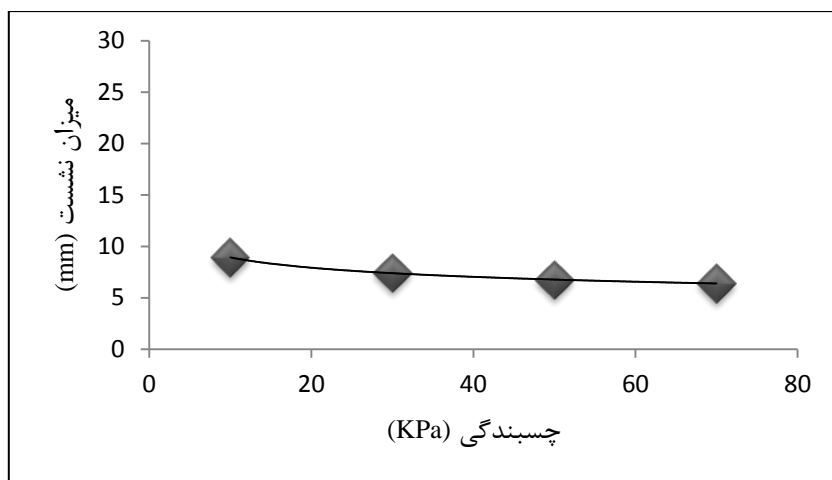
جهت تعیین ورودی‌هایی که اثر مثبت و معنی داری در پیش‌بینی سیستم ندارند، از آنالیز حساسیت استفاده شد. بدین منظور میزان تاثیرات ناشی از تغییرات هر پارامتر ورودی بر روی خروجی با استفاده از نرم افزار Plaxis بر روی یک محیط یکسان و در شرایط یکسان بررسی شد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای هر پارامتر، در شکل‌های ۴-۳۲ تا ۴-۳۶ نشان داده شده‌اند.



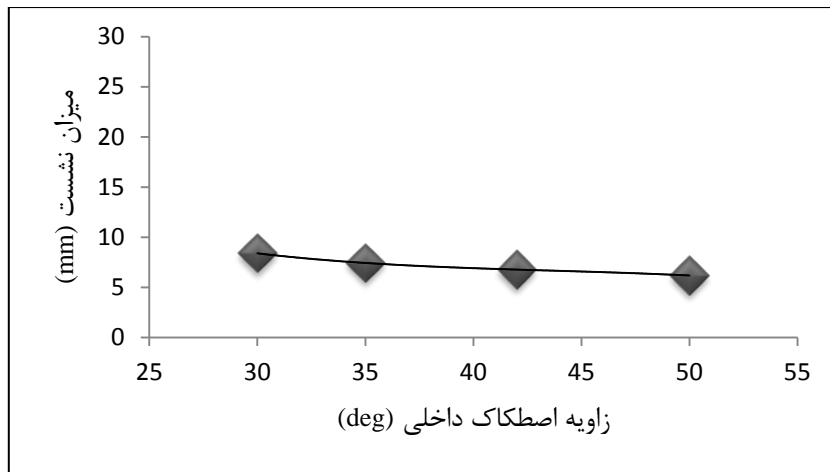
شکل ۴-۳۲- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر مدول الاستیسیته



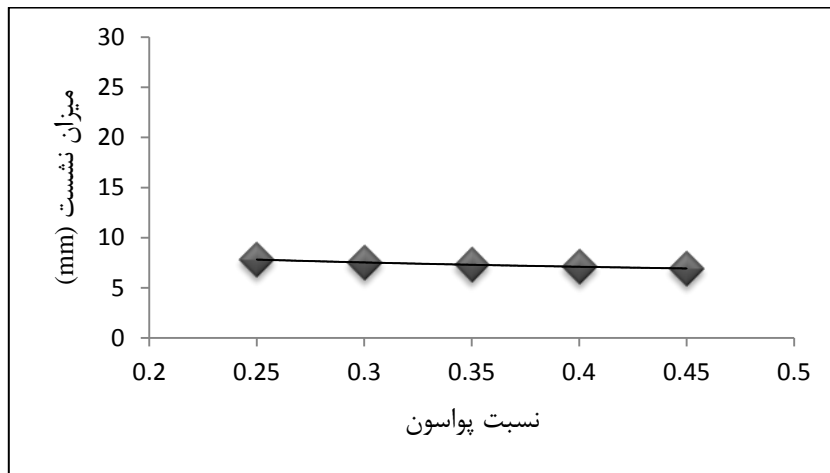
شکل ۴-۳۳- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر نسبت تنش ها



شکل ۴-۳۴- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر چسبندگی



شکل ۴-۳۵- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۴-۳۶- نمودار آنالیز حساسیت برای پارامتر نسبت پواسون

با توجه به نتایج آنالیز حساسیت مشاهده شد که پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و نسبت پواسون تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم ندارند و باید از ورودی سیستم حذف شوند. با توجه به این که نرم افزار Plaxis برای مقادیر چسبندگی نزدیک به صفر همگرا نمی‌شود (Plaxis Tunnel 3D, 2001) و مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های برجا برای پارامتر چسبندگی در حدفاصل کیلومتر ۸/۳ تا ۱۳/۷، نزدیک به صفر می‌باشند و هدف از تحلیل برگشتی دستیابی به مدلی عددی می‌باشد که توانایی شبیه‌سازی عددی رفتار آینده توده خاک را داشته باشد، پارامتر چسبندگی همراه با پارامترهای مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها و شماره گروه خاکی به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شدند.

۴-۲-۴- توليد زوج داده‌های مورد نیاز برای طراحی سیستم فازی

یک مجموعه آموزشی مناسب برای سیستم‌های هوشمند شامل، زوج داده‌های ورودی و خروجی متناظر با آن می‌باشد. انتخاب یک مجموعه آموزشی مناسب، از اهمیت زیادی برخوردار است و باید دامنه مناسبی از داده‌ها را در برگیرد، چرا که پاسخ نهایی سیستم هوشمند مستقیماً تابع مثال‌های آموزشی است. مجموعه زوج داده‌ها بایستی از دامنه مقادیر متغیرهای پیوسته و ناپیوسته و یا همچنین از تک‌تک دسته‌های متغیرهای رسته‌ای انتخاب شود. جهت طراحی سیستم فازی حدود ۸۰ زوج داده ورودی - خروجی برای هر گروه خاکی و در مجموع ۳۲۰ زوج داده ورودی - خروجی برای کل مسیر تونل تولید شد. برای تولید زوج داده‌ها از اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفر شده در مسیر استفاده شده است. به این ترتیب که با استفاده از نرم افزار Plaxis و با توجه به گروه خاکی که گمانه در آن واقع شده، نشست در سطح زمین محاسبه شده است. برای تعیین محدوده تغییرات خصوصیات توده‌خاک، از اطلاعات حاصل از گمانه مورد نظر استفاده شده و با گسترش این محدوده در بازه‌ای منطقی با توجه به مطالعات پیشین انجام شده در پروژه مورد نظر، محدوده تغییرات نهایی خصوصیات توده‌خاک تعیین شده‌اند (Zhao, Yin, 2009. Lee, Akutagawa, Yokota, 2008. Yu, Zhang,) (Yuan, 2007. Jiang, Wang, Tang, 2011. Wang, Li, Shen, 2007). برای نسبت تنش‌ها با توجه به مقدار پیش فرض که برابر با ۰/۴۵ محاسبه شده، از محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ استفاده شده است.

به عنوان نمونه اطلاعات آماری حاصل از گمانه‌های حفر شده در حد فاصل کیلومتر ۳/۴ تا کیلومتر ۶/۶ مربوط به لایه (SC), (SM), (GC), (GM) در جدول ۴-۹ آورده شده و محدوده تغییرات تعیین شده برای خصوصیات توده‌خاک، حد فاصل کیلومتر ۳/۴ تا کیلومتر ۶/۶ مربوط به لایه (SC), (SM), (GC), (GM) نیز در جدول ۴-۱۰ آورده شده است (شرکت دریاخاک پی، ۱۳۸۴. شرکت مهندسين مشاور ايران خاک، ۱۳۸۴).

جدول ۴-۹- اطلاعات آماری حاصل از گمانه‌های حفر شده در حد فاصل کیلومتر ۳/۴ الی ۶/۶ مربوط به لایه (GM), (GC), (SM), (SC)

(GM), (GC), (SM), (SC)				لایه‌ی خاک
انحراف معیار	حداکثر	میانگین	حداقل	مشخصات
۲۵	۳۶	۲۵	۱۲	چسبندگی C (KPa)
		۸۰		ضریب ارتجاعی E _s (MPa)

جدول ۴-۱۰- محدوده تغییرات تعیین شده برای خصوصیات توده‌خاک، حد فاصل کیلومتر ۳/۴ الی ۶/۶ مربوط به لایه (GM), (GC), (SM), (SC)

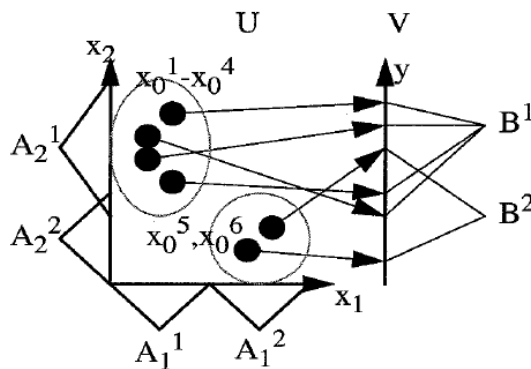
(GM), (GC), (SM), (SC)		لایه‌ی خاک
حداکثر	حداقل	مشخصات
۴۵	۱۰	چسبندگی C (KPa)
۲۰۰	۵۰	ضریب ارتجاعی E _s (MPa)

۴-۳- تعیین تعداد قوانین فازی با استفاده از خوشه‌بندی با روش

نزدیک‌ترین همسایه^۱

خوشه‌بندی با دسته‌بندی کردن داده‌های ورودی در تعداد محدودی خوشه با شعاع r پیشنهاد مناسبی برای تعیین تعداد قوانین فازی ارائه می‌دهد. بخش اگر قوانین (مختصات مرکز هر خوشه) با پارامترهای اولین ورودی‌ای که در خوشه قرار می‌گیرد و مرکز خوشه را تشکیل می‌دهد، تعیین می‌شود. بخش آنگاه قوانین نیز با میانگین‌گیری از خروجی‌های داده‌های موجود در هر خوشه تعیین می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۴-۳۷ شش ورودی، که هر ورودی متشکل از ۲ پارامتر می‌باشد (X_1, X_2) ، با استفاده از خوشه‌بندی با روش نزدیک‌ترین همسایه به ۲ خوشه تقسیم شده‌اند. ۲ قانون معادل با این خوشه بندی نیز در شکل نشان داده شده‌اند (Wang, 1997).

¹ - Nearest Neighborhood Clustering



IF x_1 is A_1^1 and x_2 is A_2^1 , THEN y is B^1

IF x_1 is A_1^2 and x_2 is A_2^2 , THEN y is B^2

شکل ۴-۳۷- خوشه‌بندی شش ورودی با روش نزدیک‌ترین همسایه به ۲ خوشه (Wang, 1997)

با توجه به این‌که بازه تغییرات مقادیر زوج داده‌های ورودی - خروجی بسیار متفاوت می‌باشد، برای ساده‌سازی مراحل طراحی، تمامی مقادیر زوج داده‌های ورودی - خروجی، در بازه ۰ تا ۱ نرمالیزه شده‌اند. رابطه (۴-۵) تابع به‌کار رفته برای نرمالیزه کردن مقادیر در بازه ۰ تا ۱ را نشان می‌دهد.

$$x_{nor} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۴-۵)$$

خوشه‌بندی زوج داده‌های ورودی - خروجی سیستم‌های فازی، توسط روش نزدیک‌ترین همسایه، با استفاده از بهینه‌سازی با الگوریتم‌های تکاملی هم‌زمان با طراحی سیستم فازی و با کدنویسی در محیط برنامه Matlab انجام شد و نتایج آن در جدول ۴-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱- نتایج حاصل از خوشه‌بندی زوج داده‌های ورودی - خروجی، هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی

تعداد قوانین	شعاع خوشه‌بندی	روش بهینه‌سازی	نوع سیستم فازی
۹	۰/۷۶	الگوریتم PSO	سیستم فازی با روش آموزش گرادیان نزولی
۹	۰/۷۶	الگوریتم PSO	سیستم فازی با الگوریتم PSO
۸	۰/۷۸	الگوریتم رقابت استعماری	سیستم فازی با الگوریتم رقابت استعماری

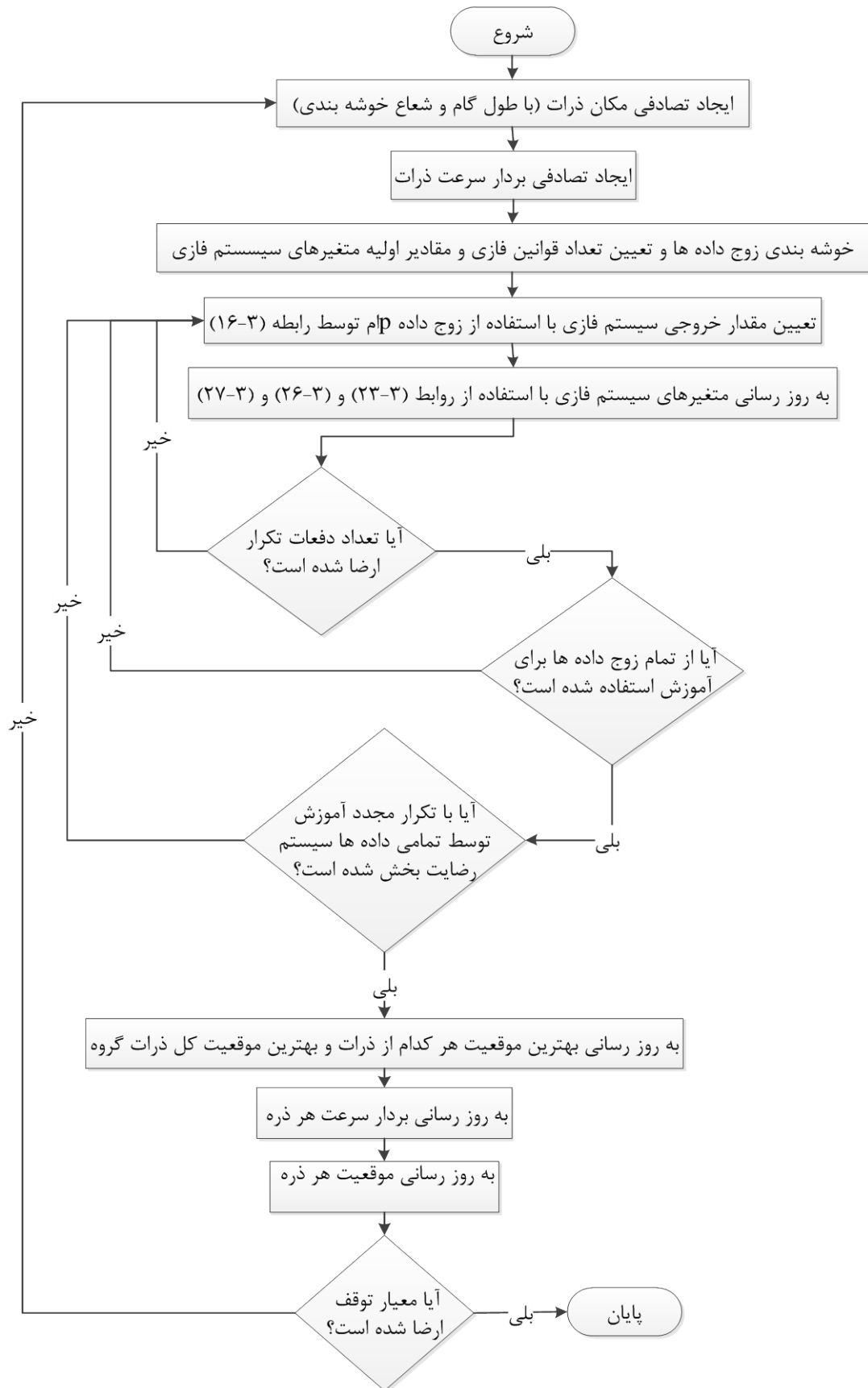
۴-۴-۴- تعیین پارامترهای مجهول سیستم‌های فازی با استفاده از زوج

داده‌های ورودی - خروجی

در واقع تا کنون تعداد توابع عضویت برای هر متغیر مشخص شده‌اند. برای تعیین مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی و تعیین میزان بازشدگی توابع عضویت متغیرهای ورودی که از نوع گوسین هستند، از روش‌های زیر استفاده شده است.

۴-۴-۴-۱- طراحی سیستم فازی با استفاده از روش گرادیان نزولی

با توجه به رابطه (۳-۱۶) مشاهده شد که فرایند اصلی در طراحی سیستم فازی، تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ می‌باشد. در طراحی سیستم فازی با استفاده از گرادیان نزولی هدف ما طراحی سیستم فازی $f(x)$ مطابق رابطه (۳-۲۸) است، به نحوی که خطای تطبیق مطابق رابطه (۳-۱۹)، مینیمم گردد. بدین ترتیب با استفاده از زوج داده‌های ورودی - خروجی تولید شده در مرحله قبل، سیستم فازی با استفاده از کد نویسی در محیط نرم افزار Matlab طراحی شد. فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی، در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ مربوط به ورودی‌ها و خروجی مدل در جداول ۴-۱۲، ۴-۱۳ تا ۴-۱۴ آورده شده است. شکل‌های ۴-۳۹ تا ۴-۴۲ نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیرهای ورودی سیستم را نشان می‌دهند. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای α و شعاع خوشه‌بندی (i) به ترتیب اعداد ۰/۲۸۷ و ۰/۷۶ بوده‌اند، که با استفاده از الگوریتم PSO به دست آمده‌اند.



شکل ۴-۳۸- فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی

جدول ۴-۱۲- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی (\bar{x}_i^l)

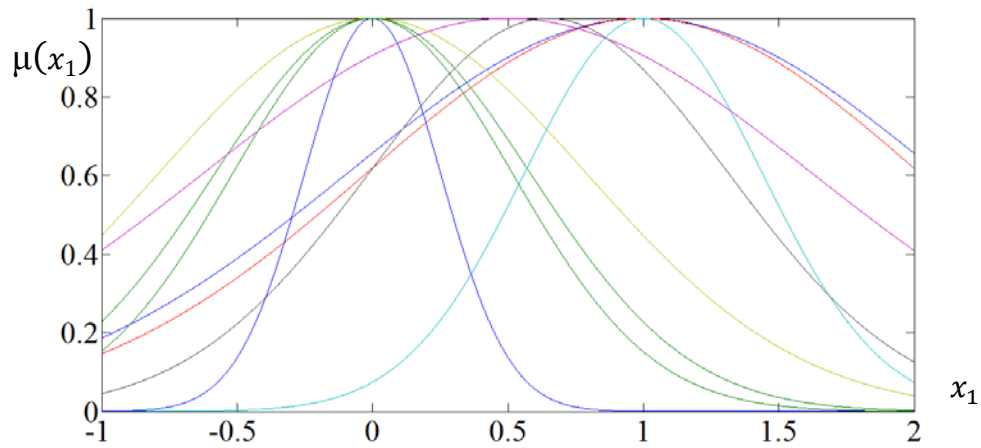
شماره تابع عضویت (l)		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متغیر ورودی (i)										
نسبت تنش‌ها	۱	۱	۰	۱	۱	۰/۵	۰	۰/۶۵	۰	۰
چسبندگی	۲	۰/۴۸	-۰/۱۶	۰/۲۴	۱/۱۷	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۳۶	-۰/۳۳	-۰/۲۸
مدول الاستیسیته	۳	۰/۶۵	۰/۲۳	-۰/۰۳	-۰/۰۷	۰/۴۸	-۰/۰۲	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۱۷
شماره گروه خاکی	۴	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۳۰	۰/۰۳	۰/۴۹	۰/۱۳	۱	۱/۱۲	۰/۹۴

جدول ۴-۱۳- مقادیر به دست آمده برای بازشدگی توابع عضویت متغیرهای ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی (σ_i^l)

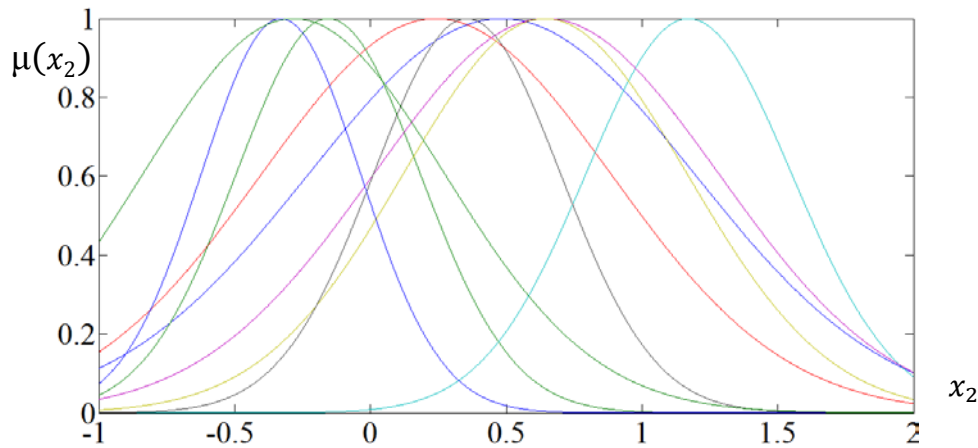
شماره تابع عضویت (l)		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متغیر ورودی (i)										
نسبت تنش‌ها	۱	۱/۰۹	۰/۵۸	۱/۰۲	۰/۴۴	۱/۱۲	۰/۷۹	۰/۶۶	۰/۲۵	۰/۵۲
چسبندگی	۲	۰/۷۱	۰/۳۴	۰/۶۴	۰/۳۸	۰/۶۳	۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۵۶
مدول الاستیسیته	۳	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۵۶	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۱۵	۱/۲۴	۰/۳۶
شماره گروه خاکی	۴	۰/۹۵	۰/۵۲	۰/۹۲	۰/۵۵	۱/۱۱	۰/۷	۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۶۳

جدول ۴-۱۴- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی (\bar{y}^l)

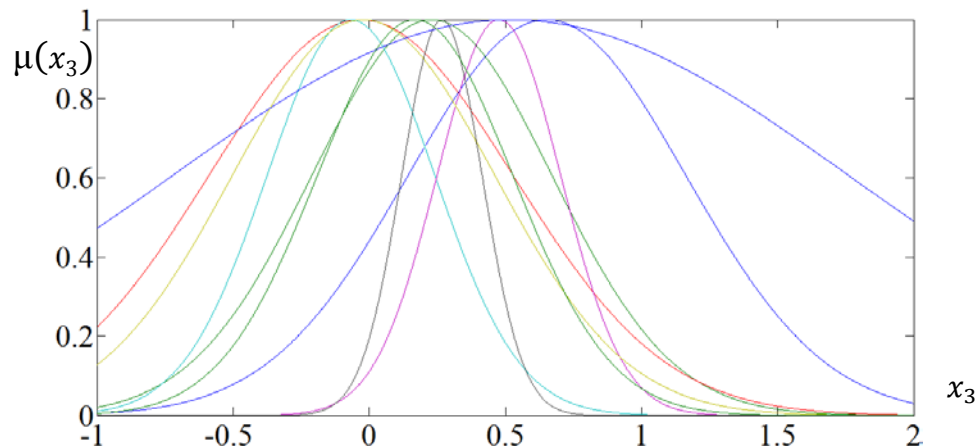
شماره تابع عضویت (l)		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متغیر خروجی										
میزان نشست	۱	-۰/۰۳	۰/۸۷	۱/۱۹	۰/۴۹	۰/۱۶	۱/۱۰	۰/۴	۰/۷۳	۱/۳۹



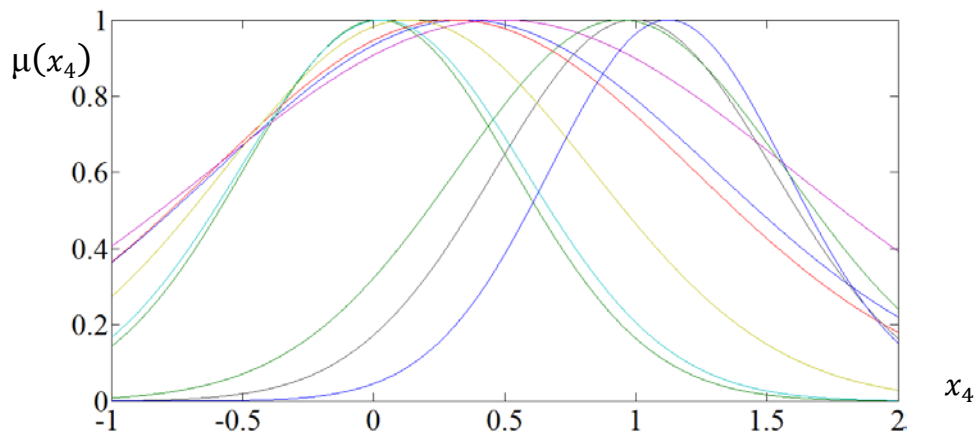
شکل ۴-۳۹- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی نسبت تنش‌ها، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی



شکل ۴-۴۰- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی چسبندگی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی



شکل ۴-۴۱- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی مدول الاستیسیته، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی



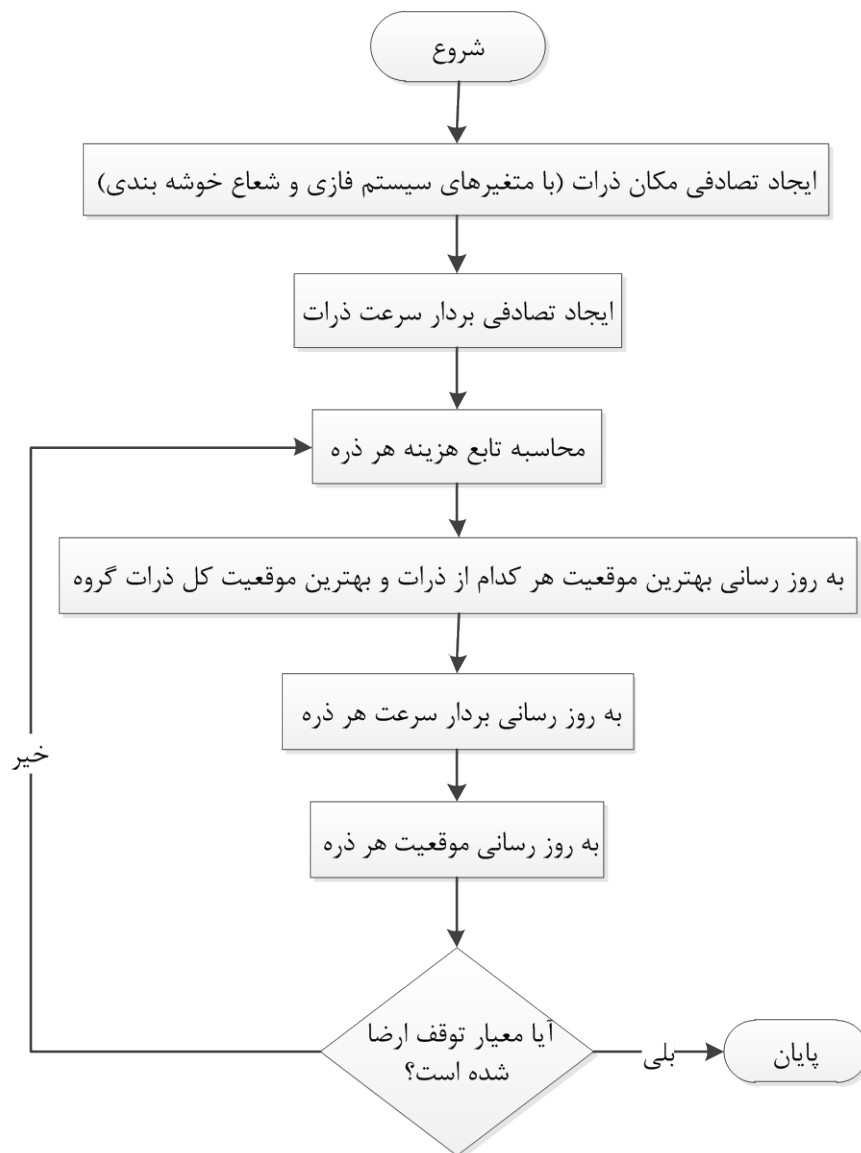
شکل ۴-۴۲- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی شماره گروه خاکی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی

۴-۴-۲- طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

همان طور که گفته شد، طراحی سیستم فازی معادل تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن رابطه (۳-۱۶) به عنوان تابع f ، پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ و شعاع خوشه‌بندی (r) ، به نحوی تعیین شده‌اند که مقدار تابع هزینه مطابق رابطه (۳-۲۸) حداقل گردد. برای حداقل کردن تابع هزینه از الگوریتم‌های تکاملی زیر استفاده شده است.

۴-۴-۲-۱- طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO

در طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO هدف ما طراحی سیستم فازی $f(x)$ مطابق رابطه (۳-۱۶) توسط تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ است، به نحوی که تابع هزینه مطابق رابطه (۳-۲۸) مینیمم گردد. بدین منظور با استفاده از زوج داده‌های ورودی - خروجی تولید شده، سیستم فازی با استفاده از کد نویسی در محیط نرم افزار Matlab طراحی شد. فلوجارت طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO، در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ مربوط به ورودی‌ها و خروجی مدل در جداول ۴-۱۵، ۴-۱۶ و ۴-۱۷ آورده شده است. شکل‌های ۴-۴۴ تا ۴-۴۷ نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیرهای ورودی سیستم را نشان می‌دهند. مقدار در نظر گرفته شده برای پارامتر شعاع خوشه‌بندی (r) عدد 0.76 بوده که هم‌زمان با تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}_i^l, \sigma_i^l$ به دست آمده است.



شکل ۴-۴۳- فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO

جدول ۴-۱۵- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO (\bar{x}_i^l)

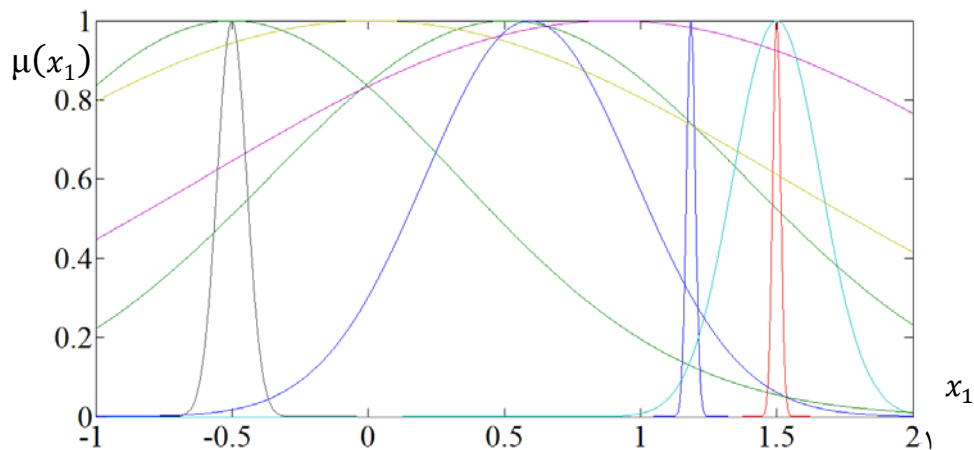
شماره تابع عضویت (i)		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متغیر ورودی (i)										
نسبت تنش‌ها	۱	۱/۱۹	۰/۵۱	۱/۵	۱/۵	۰/۹	۰/۰۱	-۰/۵	۰/۵۹	۰/۵
چسبندگی	۲	۰/۵۳	-۰/۵	۱/۰۵	۱/۴۶	۱	-۰/۲۷	-۰/۲۱	۱/۵	-۰/۵
مدول الاستیسیته	۳	۰/۵۶	۱/۵	-۰/۵	۰/۵۴	۰/۷۵	-۰/۴۲	۱/۱۶	-۰/۱۲	۰/۰۴
شماره گروه خاکی	۴	۰/۰۹	۰/۹	۱/۲۳	-۰/۰۲	۱/۳۴	۱/۰۸	۰/۹۹	۱/۵	۰/۸۵

جدول ۴-۱۶- مقادیر به دست آمده برای بازشدگی توابع عضویت متغیرهای ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO (σ_i^l)

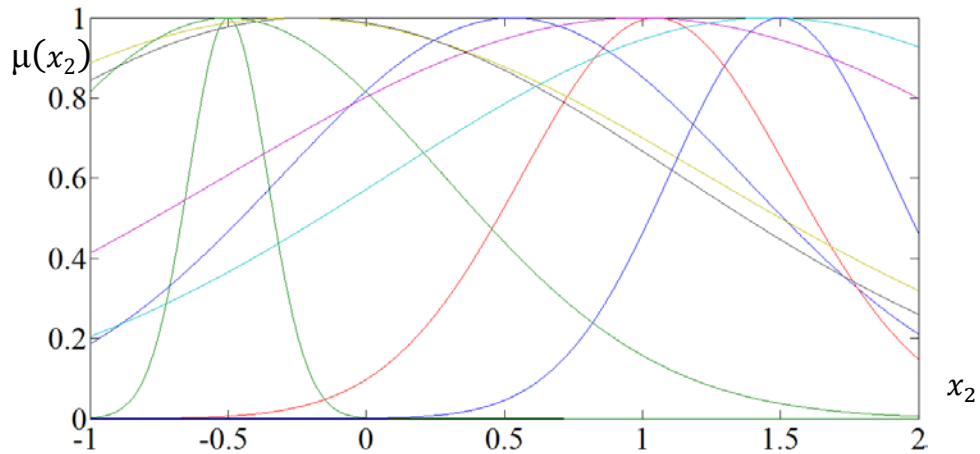
		شماره تابع عضویت (l)								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متغیر ورودی (i)										
نسبت تنش‌ها	۱	۰/۰۲	۰/۸۷	۰/۰۲	۰/۱۶	۱/۵	۱/۵	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۸۳
چسبندگی	۲	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۴۹	۱/۳۸	۱/۵	۱/۵	۱/۳۵	۰/۴	۰/۷۸
مدول الاستیسیته	۳	۱/۵	۰/۳	۰/۱۴	۰/۶	۰/۶۳	۰/۶۷	۱/۰۲	۰/۵۳	۱/۵
شماره گروه خاکی	۴	۰/۵۵	۰/۱۲	۰/۷۳	۰/۵۱	۱/۲۴	۱/۵	۰/۲۴	۱/۲۶	۰/۵۵

جدول ۴-۱۷- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO (\bar{y}^l)

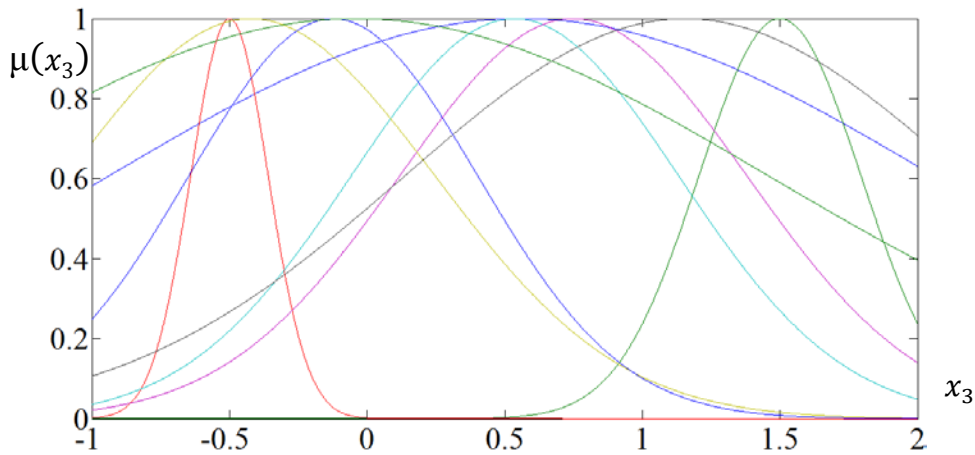
		شماره تابع عضویت (l)								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متغیر خروجی										
میزان نشست	۱	-۰/۱۶	۰/۵۶	۰/۳	-۰/۴	۰/۰۶	۱/۲۵	۰/۳۵	۱/۱	۰/۷۵



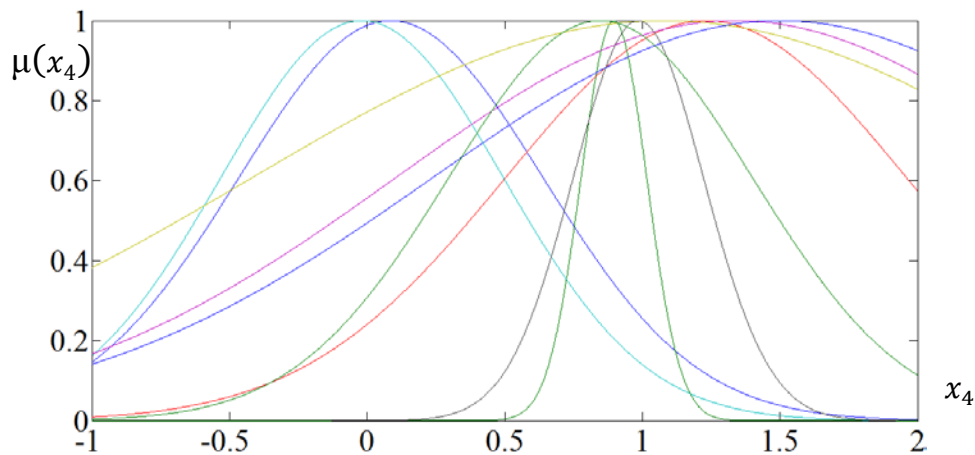
شکل ۴-۴۴- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی نسبت تنش‌ها، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO



شکل ۴-۴۵- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی چسبندگی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO



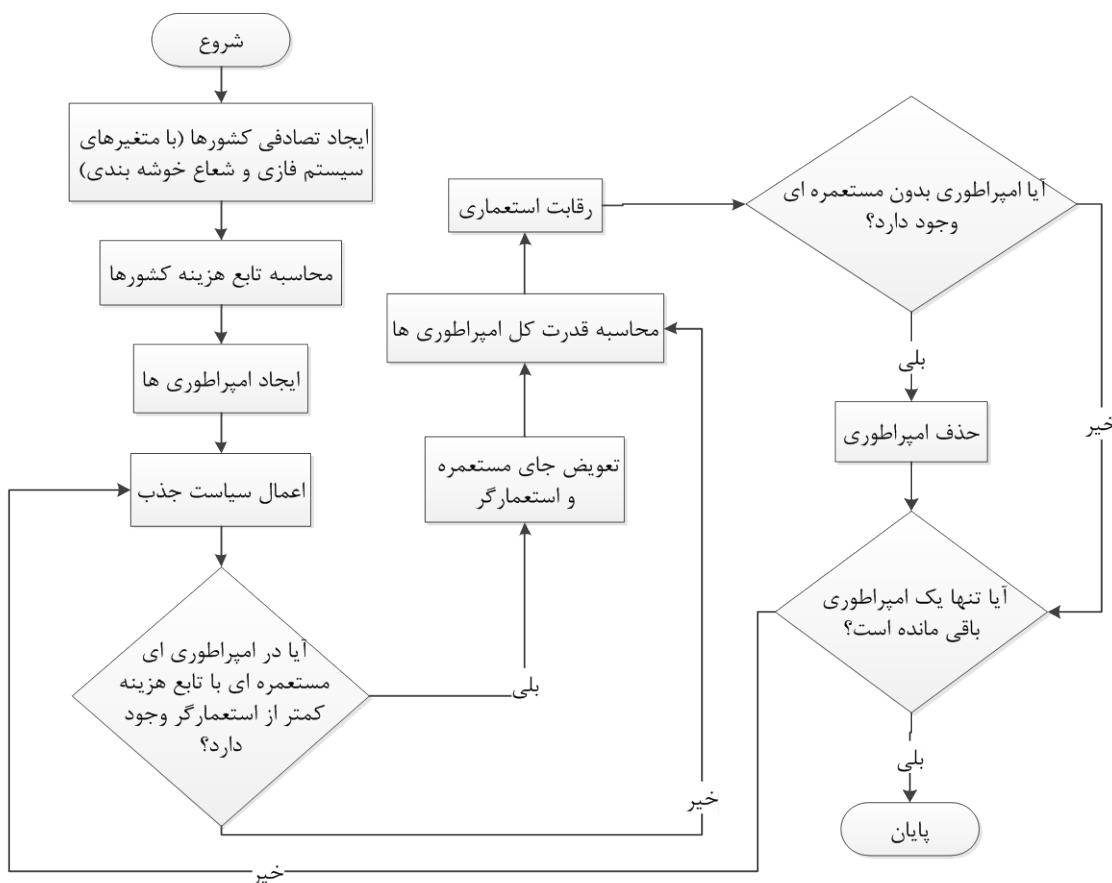
شکل ۴-۴۶- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی مدول الاستیسیته، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO



شکل ۴-۴۷- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی شماره گروه خاکی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO

۴-۴-۲-۲- طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

در طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری نیز هدف ما طراحی سیستم فازی $f(x)$ مطابق رابطه (۳-۱۶) توسط تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}^l, \sigma_i^l$ است، به نحوی که تابع هزینه مطابق رابطه (۳-۲۸) مینیمم گردد. بدین منظور با استفاده از زوج داده‌های ورودی - خروجی تولید شده، سیستم فازی با استفاده از کد نویسی در محیط نرم افزار Matlab طراحی شد. فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، در شکل ۴-۴۸ نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}^l, \sigma_i^l$ مربوط به ورودی‌ها و خروجی مدل، در جداول ۴-۱۸، ۴-۱۹ و ۴-۲۰ آورده شده است. شکل‌های ۴-۴۹ تا ۴-۵۲ نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیرهای ورودی سیستم را نشان می‌دهند. مقدار در نظر گرفته شده برای پارامتر شعاع خوشه‌بندی (r) عدد 0.78 بوده که هم‌زمان با تعیین پارامترهای $\bar{x}_i^l, \bar{y}^l, \sigma_i^l$ به دست آمده است.



شکل ۴-۴۸- فلوچارت طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

جدول ۴-۱۸- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (\bar{x}_i^l)

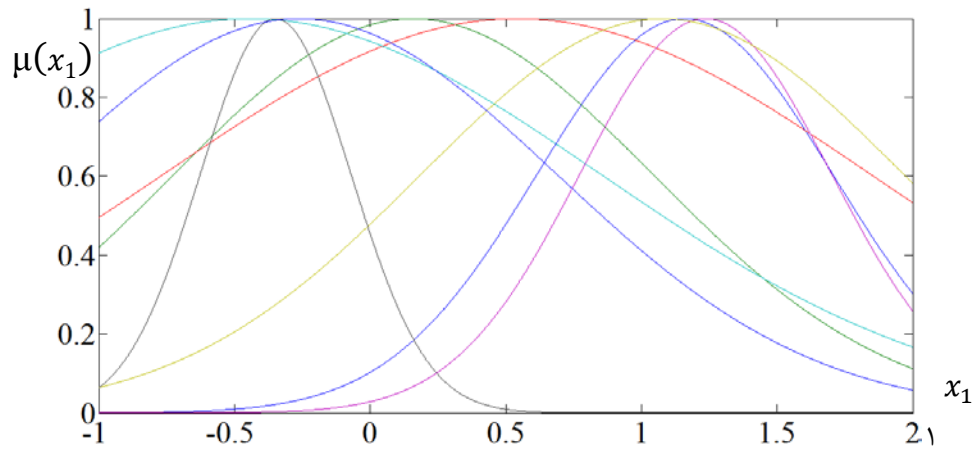
شماره تابع عضویت (l)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	متغیر ورودی (i)
نسبت تنش‌ها	۱/۱۶	۰/۱۶	۰/۵۴	-۰/۴۵	۱/۲۴	۱/۰۸	-۰/۳۵	-۰/۲۶	
چسبندگی	۰/۹۹	۰/۶۱	۰/۲۹	-۰/۰۶	۰/۸۳	۰/۵۳	۱/۳۳	۰/۳۶	
مدول الاستیسیته	۱/۳۵	۱/۱۹	۱/۰۵	۱/۱۶	-۰/۲۶	۰/۰۶	۰/۰۳	-۰/۳۵	
شماره گروه خاکی	۰/۵۵	۰/۷۵	۱/۰۶	-۰/۱۷	۰/۷۵	۰/۵۶	۰/۴۱	۰/۷۴	

جدول ۴-۱۹- مقادیر به دست آمده برای بازشدگی توابع عضویت متغیرهای ورودی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (σ_i^l)

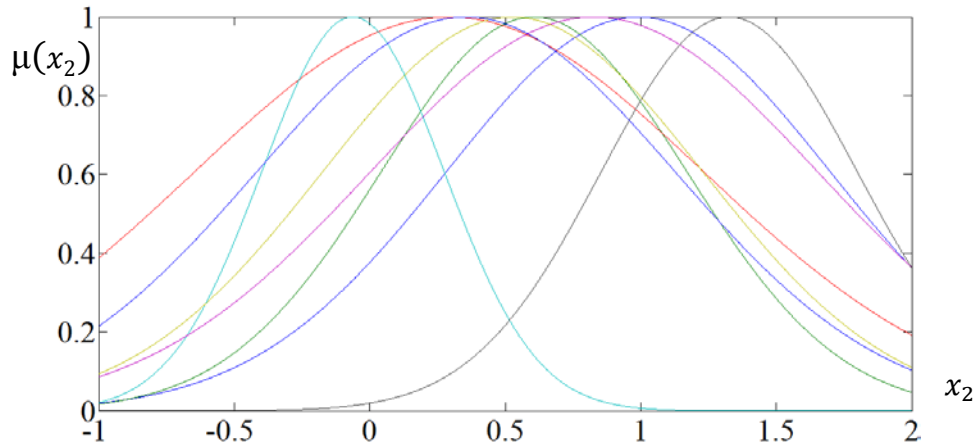
شماره تابع عضویت (l)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	متغیر ورودی (i)
نسبت تنش‌ها	۰/۵۴	۰/۸۸	۱/۳	۱/۲۹	۰/۴۶	۰/۸۹	۰/۲۸	۰/۹۵	
چسبندگی	۰/۷۱	۰/۵۶	۰/۹۴	۰/۳۴	۰/۸۳	۰/۷	۰/۴۷	۰/۷۷	
مدول الاستیسیته	۰/۰۶	۰/۸۴	۰/۱۳	۰/۰۵	۱/۰۱	۱	۰/۶۲	۰/۸۴	
شماره گروه خاکی	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۴۵	۱/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۱	۱/۰۳	

جدول ۴-۲۰- مقادیر به دست آمده برای مراکز توابع عضویت متغیر خروجی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (\bar{y}^l)

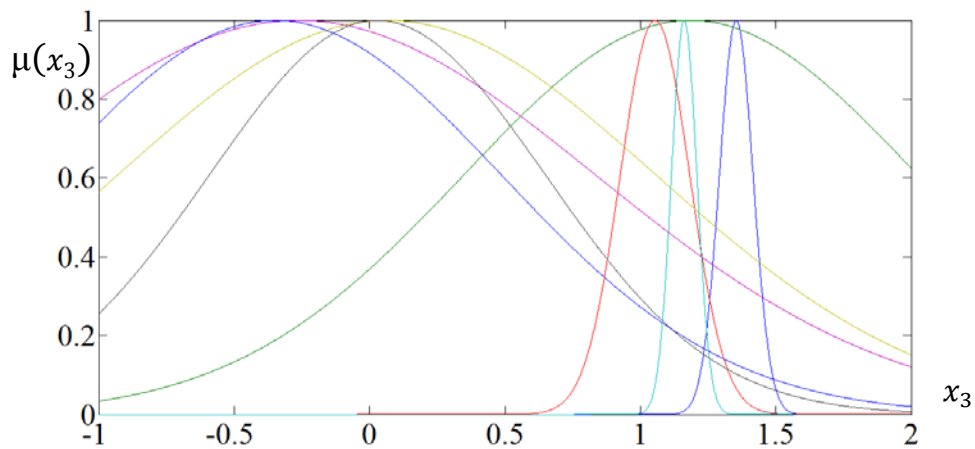
شماره تابع عضویت (l)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	متغیر خروجی
میزان نشست	۰/۵۲	-۰/۰۳	۰/۷۸	۰/۶۸	۱/۴۶	۰/۰۳	۱/۱۶	۰/۹۵	



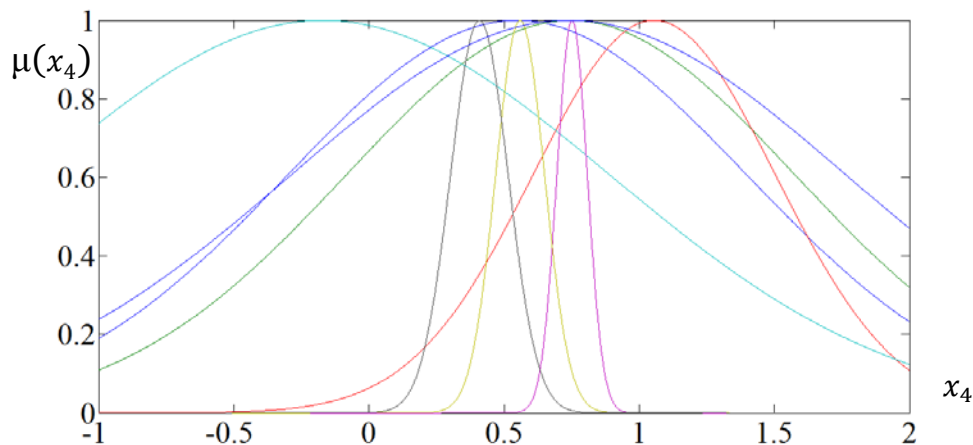
شکل ۴-۴۹- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی نسبت تنش‌ها، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۴-۵۰- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی چسبندگی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۴-۵۱- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی مدول الاستیسیته، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۴-۵۲- نمایش گرافیکی توابع عضویت به دست آمده برای متغیر ورودی شماره گروه خاکی، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

۴-۴-۵ تحلیل برگشتی هوشمند ایستگاه‌های نشست سنجی خط ۲ مترو

کرج

برای بررسی عملکرد سیستم‌های فازی طراحی شده، از نتایج قرائت ابزارهای نشست سنجی استفاده شده است. بدین منظور تعداد ۲۰ ایستگاه که قرائت‌های نشست سنجی ناشی از حفر بخش فوقانی در آن‌ها به تعادل رسیده بود، انتخاب شد و میزان نشست در سطح زمین و در بالای مرکز قوس تونل با استفاده از نمودارهای نشست سنجی به دست آمد. سپس با استفاده از سیستم‌های فازی طراحی شده و با در نظر گرفتن گروه خاکی که ایستگاه نشست سنجی مورد نظر در آن واقع شده، خصوصیات توده خاک و شرایط تنش منطقه تخمین زده شد. نشست ناشی از حفر بخش فوقانی تونل در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی انتخاب شده، با دقت ۰/۱ میلی‌متر، در جدول ۴-۲۱ نشان داده شده اند.

جدول ۴-۲۱- نشست ناشی از حفر بخش فوقانی تونل در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی انتخاب شده

میزان نشست (mm)	نام ایستگاه	میزان نشست (mm)	نام ایستگاه
۵/۸	R1-E2-S-7+275	۶/۴	R6-E2-S-8+765
۶/۳	R1-E2-S-7+275	۶/۵	R7-N2-S-9+150
۳/۷	R1-E4-S-7+450	۷	R7-N3-S-9+100
۴	R11-A-S-7+930	۶/۴	R7-S2-S-9+280
۵/۵	R11-E1-S-7+935	۶/۲	R7-S4-S-9+445
۴/۱	R11-E2-S-7+995	۶/۳	R8-E4-S-11+840
۶/۲	R11-E3-S-8+074	۶/۹	R8-E5-S-11+950
۴/۵	R11-E5-S-8+135	۶/۵	R8-W2-S-11+511
۵/۵	R11-W1-S-7+920	۶/۵	R10-E3-S-10+470
۴/۸	R11-W3-S-7+890	۶/۶	R10-E4-S-10+580

برای تخمین خصوصیات توده خاک و شرایط تنش منطقه‌ای معادل با میزان نشست‌های به دست آمده از نمودار نشست سنجی ایستگاه‌ها، از روش زیر استفاده شده است.

سیستم فازی طراحی شده یک تابع می‌باشد که ورودی‌های آن، گروه خاکی که ایستگاه نشست سنجی مورد نظر در آن واقع شده، خصوصیات توده خاک و شرایط تنش منطقه و خروجی آن، میزان نشست تخمین زده شده می‌باشند. با توجه به اینکه مقدار خروجی تابع معلوم می‌باشد، می‌توان با تعریف یک تابع هزینه و با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، مقادیر ورودی تابع را به نحوی تخمین زد که میزان تابع هزینه حداقل گردد (Yu, Zhao, Yin, 2009. Lee, Akutagawa, Yokota, 2008. Zhang, Yuan, 2007. Jiang, Wang, Tang, 2011. Wang, Li, Shen, 2007). برای سیستم‌های فازی طراحی شده، از الگوریتم‌های تکاملی مختلف، مطابق جدول ۴-۲۲ جهت تخمین مقادیر ورودی

استفاده شده است.

جدول ۴-۲۲- نوع الگوریتم تکاملی مورد استفاده برای تخمین مقادیر ورودی سیستم‌های فازی طراحی شده، به نحوی که میزان تابع هزینه حداقل گردد

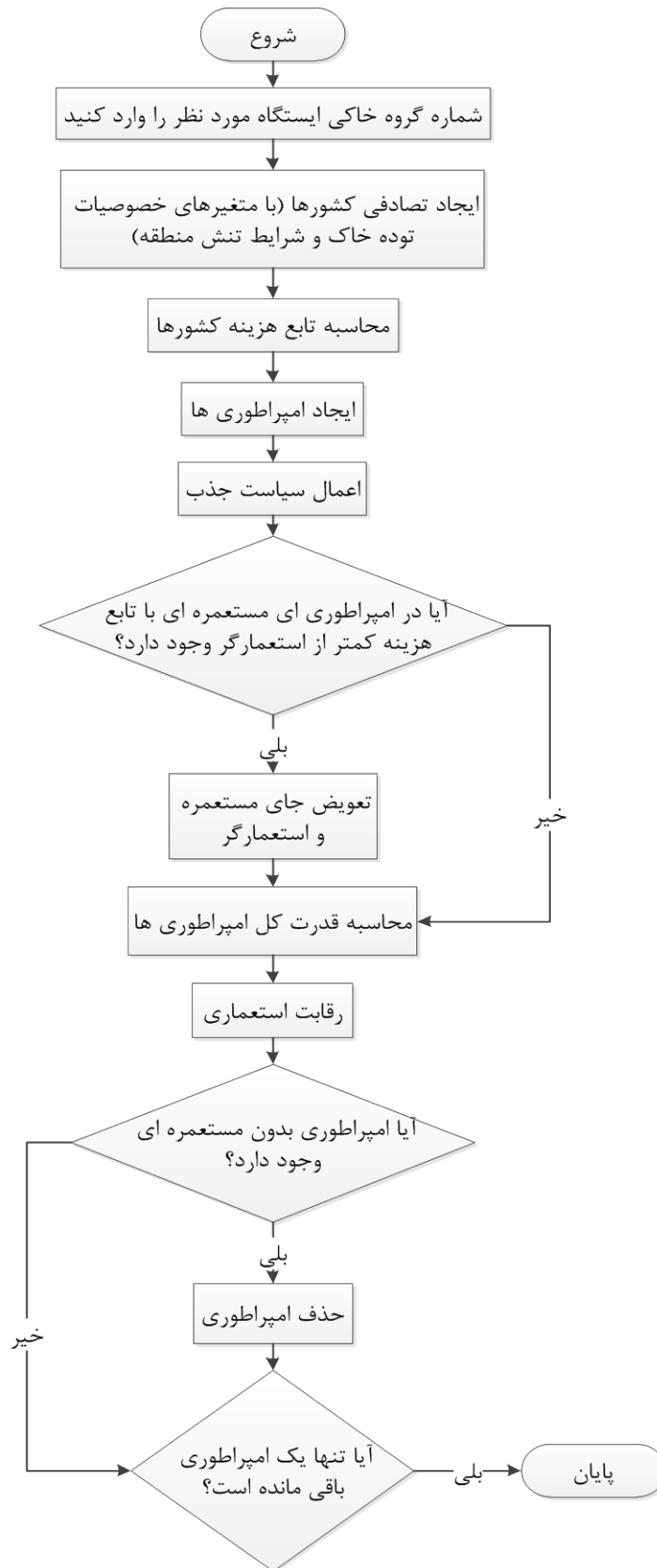
نوع الگوریتم تکاملی مورد استفاده	نوع سیستم فازی طراحی شده
الگوریتم رقابت استعماری	سیستم فازی طراحی شده با روش گرادیان نزولی
الگوریتم PSO	سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO
الگوریتم رقابت استعماری	سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری

تابع هزینه مطابق رابطه (۴-۶) تعریف شده است.

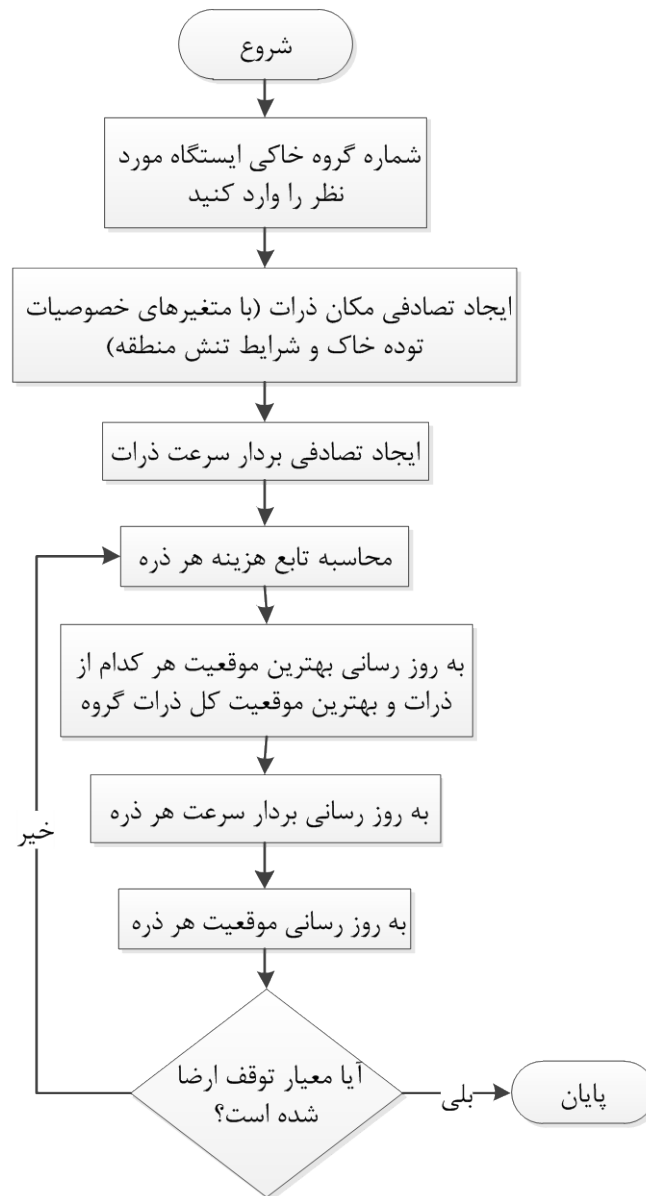
$$\text{cost} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{n} \quad (4-6)$$

که در آن y_i مقدار نشست تخمین زده شده برای ایستگاه نشست سنجی i ام توسط سیستم فازی، f_i میزان نشست به دست آمده از ایستگاه نشست سنجی i ام و n تعداد ایستگاه‌های نشست سنجی انتخاب شده (۲۰) می‌باشند.

فلوچارت تحلیل برگشتی هوشمند برای سیستم‌های فازی طراحی شده در شکل‌های ۴-۵۳ و ۴-۵۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی هوشمند ۲۰ ایستگاه نشست سنجی توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO نیز، در جدول ۴-۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۳- فلوچارت تحلیل برگشتی هوشمند توسط الگوریتم رقابت استعماری، برای سیستم‌های فازی طراحی شده با استفاده از روش آموزش گرادیان نزولی و الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۴-۵۴- فلوچارت تحلیل برگشتی هوشمند توسط الگوریتم PSO، برای سیستم فازی طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO

جدول ۴-۲۳- نتایج حاصل از تحلیل برگشتی هوشمند ۲۰ ایستگاه نشست سنجی توسط الگوریتم PSO، برای سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO،

نسبت تنش‌ها	چسبندگی C (KPa)	ضریب ارتجاعی E_s (MPa)	نام ایستگاه
۰/۵	۱۱	۲۰۳۲۲۲	R6-E2-S-8+765
۰/۵۸	۳۰	۱۵۱۸۶۰	R7-N2-S-9+150
۰/۵۶	۲۶	۱۴۸۴۲۰	R7-N3-S-9+100
۰/۵۷	۱۶	۱۷۶۵۲۷	R7-S2-S-9+280
۰/۴۳	۲۴	۲۰۸۳۶۷	R7-S4-S-9+445
۰/۵	۲۴	۱۸۵۷۵۸	R8-E4-S-11+840
۰/۴۸	۱۱	۱۹۴۹۶۰	R8-E5-S-11+950
۰/۵۸	۴۰	۱۴۰۷۷۶	R8-W2-S-11+511
۰/۴۵	۳۵	۱۷۴۵۵۷	R10-E3-S-10+470
۰/۵۸	۳۳	۱۴۴۱۸۷	R10-E4-S-10+580
۰/۵۴	۸	۲۴۳۳۵۳	R1-E1-S-7+140
۰/۴	۴۴	۲۰۷۸۳۸	R1-E2-S-7+275
۰/۴۴	۴۳	۳۵۲۲۵۰	R1-E4-S-7+450
۰/۴۴	۲۱	۳۵۹۴۸۳	R11-A-S-7+930
۰/۴۴	۳۲	۲۴۲۵۸۸	R11-E1-S-7+935
۰/۵	۴۴	۲۸۷۸۳۵	R11-E2-S-7+995
۰/۵۴	۱۴	۲۲۱۵۶۷	R11-E3-S-8+074
۰/۵۱	۴۷	۲۵۵۹۹۵	R11-E5-S-8+135
۰/۵	۱۴	۲۵۳۷۶۰	R11-W1-S-7+920
۰/۴۵	۹	۳۱۳۹۱۳	R11-W3-S-7+890

۴-۴-۵- اعتبار سنجی سیستم‌های فازی طراحی شده برای تحلیل

برگشتی هوشمند

برای تعیین دقت سیستم‌های فازی طراحی شده، با توجه به گروه خاکی مربوطه و با استفاده از خصوصیات توده خاک و شرایط تنش منطقه‌ای تخمین‌زده شده با استفاده از سیستم‌های فازی، مراحل حفر بخش فوقانی تونل با استفاده از نرم افزار Plaxis مدل شده و میزان نشست در سطح زمین و در بالای مرکز قوس تونل محاسبه شده است. میزان اختلاف نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis و نشست به‌دست آمده از نمودار نشست سنجی در ایستگاه مورد نظر، نشان دهنده میزان خطای سیستم‌های فازی طراحی شده می‌باشد (Zhao, Yin, 2009. Lee, Akutagawa, Yokota, 2008. Wang, Li, Shen, 2007. Yu, Zhang, Yuan, 2007. Jiang, Wang, Tang, 2011.).

در جدول‌های ۴-۲۴ تا ۴-۲۶ میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر تخمین‌زده شده توسط سیستم‌های فازی و میزان نشست به‌دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی‌متر نشان داده شده‌اند. در شکل‌های ۴-۵۵ تا ۴-۵۷ میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر تخمین‌زده شده توسط سیستم‌های فازی و میزان نشست به‌دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی‌متر مقایسه شده‌اند.

جدول ۴-۲۴- میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با روش گرادیان نزولی و نشست به دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی متر

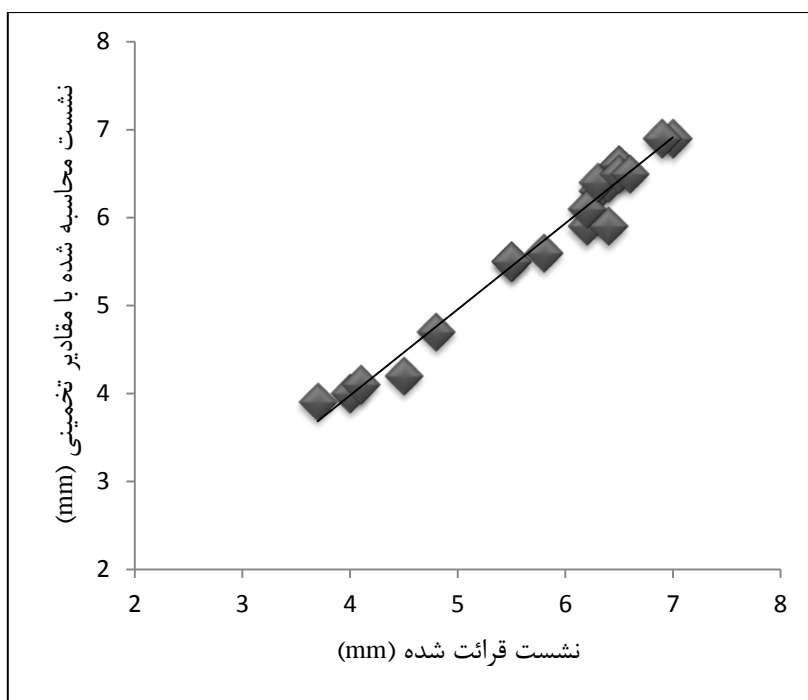
نام ایستگاه	نشست قرائت شده (mm)	نشست محاسبه شده با مقادیر تخمینی (mm)
R6-E2-S-8+765	۶/۴	۵/۹
R7-N2-S-9+150	۶/۵	۶/۶
R7-N3-S-9+100	۷	۶/۹
R7-S2-S-9+280	۶/۴	۶/۴
R7-S4-S-9+445	۶/۲	۶/۱
R8-E4-S-11+840	۶/۳	۶/۴
R8-E5-S-11+950	۶/۹	۶/۹
R8-W2-S-11+511	۶/۵	۶/۶
R10-E3-S-10+470	۶/۵	۶/۵
R10-E4-S-10+580	۶/۶	۶/۵
R1-E1-S-7+140	۵/۸	۵/۶
R1-E2-S-7+275	۶/۳	۶/۳
R1-E4-S-7+450	۳/۷	۳/۹
R11-A-S-7+930	۴	۴
R11-E1-S-7+935	۵/۵	۵/۵
R11-E2-S-7+995	۴/۱	۱/۴
R11-E3-S-8+074	۶/۲	۵/۹
R11-E5-S-8+135	۴/۵	۴/۲
R11-W1-S-7+920	۵/۵	۵/۵
R11-W3-S-7+890	۴/۸	۴/۷

جدول ۴-۲۵- میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO و نشست به دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی متر

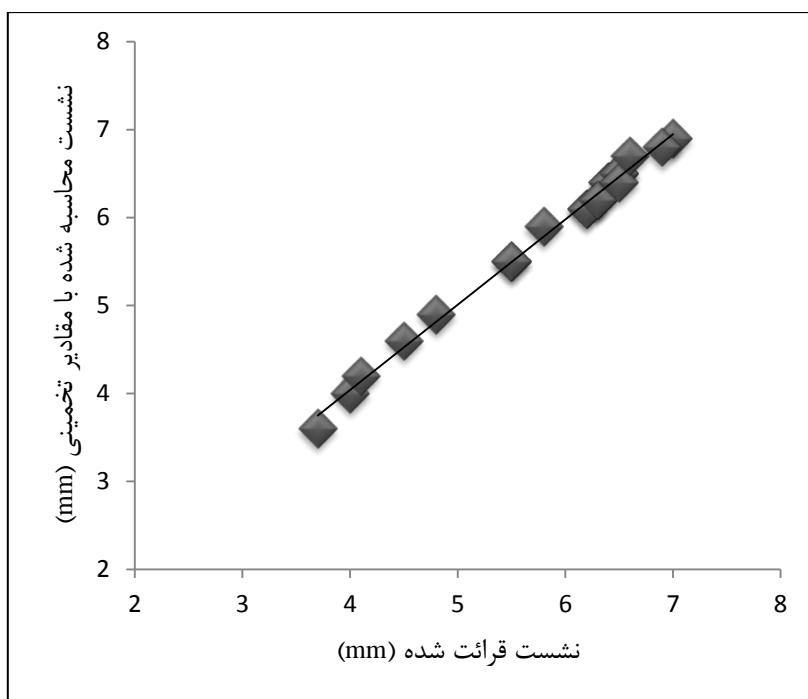
نام ایستگاه	نشست قرائت شده (mm)	نشست محاسبه شده با مقادیر تخمینی (mm)
R6-E2-S-8+765	۶/۴	۶/۴
R7-N2-S-9+150	۶/۵	۶/۵
R7-N3-S-9+100	۷	۶/۹
R7-S2-S-9+280	۶/۴	۶/۴
R7-S4-S-9+445	۶/۲	۶/۱
R8-E4-S-11+840	۶/۳	۶/۲
R8-E5-S-11+950	۶/۹	۶/۸
R8-W2-S-11+511	۶/۵	۶/۵
R10-E3-S-10+470	۶/۵	۶/۴
R10-E4-S-10+580	۶/۶	۶/۷
R1-E1-S-7+140	۵/۸	۵/۹
R1-E2-S-7+275	۶/۳	۶/۲
R1-E4-S-7+450	۳/۷	۳/۶
R11-A-S-7+930	۴	۴
R11-E1-S-7+935	۵/۵	۵/۵
R11-E2-S-7+995	۴/۱	۴/۲
R11-E3-S-8+074	۶/۲	۶/۱
R11-E5-S-8+135	۴/۵	۴/۶
R11-W1-S-7+920	۵/۵	۵/۵
R11-W3-S-7+890	۴/۸	۴/۹

جدول ۴-۲۶- نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری و نشست به دست آمده از نمودار نشست سنجی برای ۲۰ ایستگاه مورد نظر، با دقت ۰/۱ میلی متر

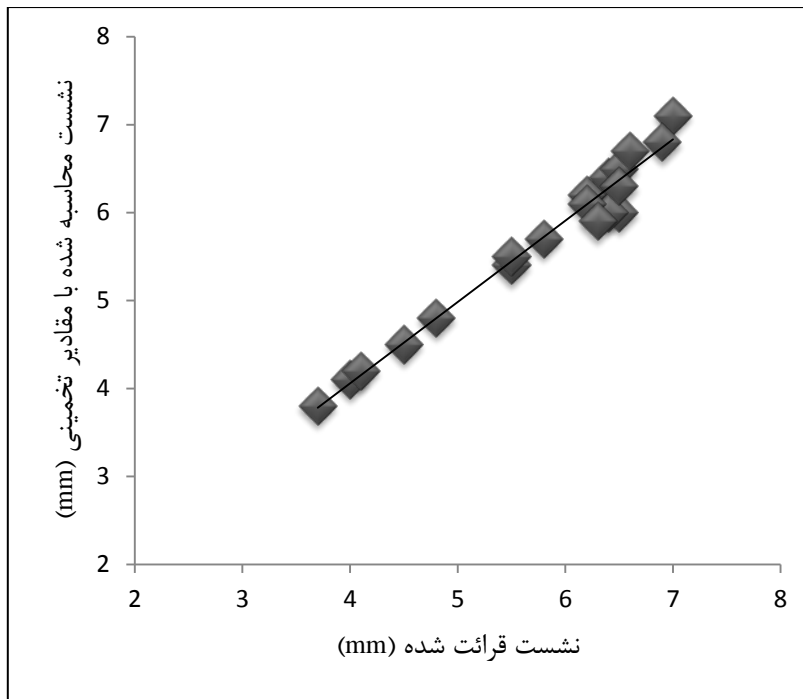
نام ایستگاه	نشست قرائت شده (mm)	نشست محاسبه شده با مقادیر تخمینی (mm)
R6-E2-S-8+765	۶/۴	۶/۴
R7-N2-S-9+150	۶/۵	۶
R7-N3-S-9+100	۷	۷/۱
R7-S2-S-9+280	۶/۴	۶
R7-S4-S-9+445	۶/۲	۶/۱
R8-E4-S-11+840	۶/۳	۵/۹
R8-E5-S-11+950	۶/۹	۶/۸
R8-W2-S-11+511	۶/۵	۶/۵
R10-E3-S-10+470	۶/۵	۶/۳
R10-E4-S-10+580	۶/۶	۶/۷
R1-E1-S-7+140	۵/۸	۵/۷
R1-E2-S-7+275	۶/۳	۶/۲
R1-E4-S-7+450	۳/۷	۳/۸
R11-A-S-7+930	۴	۱/۴
R11-E1-S-7+935	۵/۵	۵/۴
R11-E2-S-7+995	۴/۱	۴/۲
R11-E3-S-8+074	۶/۲	۶/۲
R11-E5-S-8+135	۴/۵	۴/۵
R11-W1-S-7+920	۵/۵	۵/۵
R11-W3-S-7+890	۴/۸	۴/۸



شکل ۴-۵۵- مقایسه نشست محاسبه شده با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با روش گرادیان نزولی و نشست به دست آمده از قرائت نشست سنجی، در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی



شکل ۴-۵۶- مقایسه نشست محاسبه شده با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO و نشست به دست آمده از قرائت نشست سنجی، در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی



شکل ۴-۵۷- مقایسه نشست محاسبه شده با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری و نشست به دست آمده از قرائت نشست سنجی، در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی

برای مقایسه سیستم‌های فازی طراحی شده از معیار MSE، مطابق رابطه (۴-۷) استفاده شد و نتایج حاصل در جدول ۴-۲۷ آورده شده است.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{n} \quad (4-7)$$

که در آن y میزان نشست محاسبه شده با نرم افزار Plaxis با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط سیستم فازی طراحی شده، f میزان نشست به دست آمده از هر نمودار نشست سنجی و n تعداد ایستگاه‌های نشست سنجی انتخاب شده (۲۰) می‌باشند.

جدول ۴-۲۷- مقدار معیار MSE هر یک از سیستم‌های فازی طراحی شده

MSE	نوع سیستم فازی طراحی شده
۰/۰۲۹	سیستم فازی طراحی شده با روش گرادیان نزولی
۰/۰۰۶۵	سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO
۰/۰۳۵۵	سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری

با توجه به جدول ۴-۲۷ مشاهده شد که تمام سیستم فازی طراحی شده دارای عملکرد بسیار خوبی بوده و سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO، از بهترین عملکرد جهت تحلیل برگشتی هوشمند، برخوردار می‌باشد.

۴-۵- نتیجه‌گیری

تحلیل برگشتی هوشمند روشی است برای تعیین رابطه غیر خطی موجود بین مقادیر ورودی روش‌های عددی (پارامترهای ژئومکانیکی) و مقادیر خروجی حاصل (جابه‌جایی‌ها) توسط سیستم‌های هوشمند که بدین منظور از اطلاعات جمع‌آوری شده در منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود.

در این فصل ۳ سیستم فازی برای تحلیل برگشتی خط ۲ مترو کرج طراحی شد. برای تولید زوج داده‌های مورد نیاز از اطلاعات مربوط به ۴ گروه خاکی تشخیص داده شده و مدل‌سازی عددی توسط نرم افزار Plaxis 3D استفاده شد. سپس ۳ سیستم فازی با ورودی‌های شماره گروه خاکی، مدول الاستیسیته، چسبندگی و شرایط تنش منطقه و خروجی میزان نشست سطحی، با استفاده از روش‌های آموزش‌گرایان نزولی، الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات و الگوریتم رقابت استعماری طراحی شدند. تعیین تعداد قوائد فازی، توسط خوشه‌بندی با روش نزدیک‌ترین همسایه، هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی انجام شد. برای بررسی عملکرد سیستم‌های فازی طراحی شده، از نتایج حاصل از قرائت‌های نشست سنجی ثبت شده در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی پروژه خط ۲ مترو کرج استفاده شد. برای تعیین ورودی‌های معادل با میزان نشست ثبت شده در ایستگاه‌های نشست سنجی در هر سیستم فازی، از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شد. نتایج نشان دادند که هر ۳ سیستم از عملکرد بسیار خوبی برخوردارند و سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO با معیار MSE ۰/۰۰۶۵ دارای بهترین عملکرد می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہ اداات

۵-۱- مقدمه

در این مطالعه تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌خاک و شرایط تنش منطقه‌ای در حد فاصل کیلومتر ۳/۴ تا ۱۳/۷ با استفاده از سه نوع سیستم فازی انجام شد. بدین منظور با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا و مطالعات زمین‌شناسی و مدل‌سازی عددی تونل پروژه خط ۲ مترو کرج با نرم افزار Plaxis 3D Tunnel زوج داده‌های ورودی - خروجی مورد نیاز جهت طراحی سیستم‌های فازی تولید شد. برای مشخص کردن ساختار سیستم فازی، موتور استنتاج ضرب، فازی‌ساز منفرد، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز و توابع تعلق گوسین در نظر گرفته شد. تعداد قواعد فازی با خوشه‌بندی با روش نزدیک‌ترین همسایه، هم‌زمان با طراحی سیستم‌های فازی با استفاده از روش‌های مبتنی بر گرادیان و روش‌های آزاد از گرادیان تعیین شد. از روش‌های مبتنی بر گرادیان، روش گرادیان نزولی و از روش‌های آزاد از گرادیان، روش‌های بهینه‌سازی جمعی ذرات و الگوریتم رقابت استعماری برای طراحی سیستم‌های فازی استفاده شدند. ورودی‌های سیستم‌های فازی برای تحلیل برگشتی هوشمند، شماره گروه خاکی، خصوصیات توده‌خاک و شرایط تنش منطقه و خروجی متناظر آن‌ها میزان نشست سطحی، در نظر گرفته شد. برای بررسی عملکرد سیستم‌های فازی طراحی شده، از نتایج حاصل از قرائت‌های نشست سنجی ثبت شده در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی پروژه خط ۲ مترو کرج استفاده شد. برای تعیین ورودی‌های معادل با میزان نشست ثبت شده در ایستگاه‌های نشست سنجی در هر سیستم فازی، از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شد.

۵-۲- نتیجه‌گیری

• با توجه به نتایج آنالیز حساسیت مشاهده شد که پارامترهای مدول الاستیسیته و نسبت تنش‌ها بیشترین تاثیر را بر عملکرد سیستم دارند. با توجه به این‌که نرم افزار Plaxis برای مقادیر چسبندگی نزدیک به صفر همگرا نمی‌شود و مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های برجا برای پارامتر چسبندگی در حدفاصل کیلومتر ۸/۳ تا ۱۳/۷، نزدیک به صفر بود، پارامتر چسبندگی همراه با پارامترهای مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها و شماره گروه خاکی به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شدند.

• با افزایش پارامترهای ورودی سیستم برای تحلیل برگشتی هوشمند تعداد مینیمم‌های محلی تابع افزایش می‌یابند و در نتیجه احتمال یکتایی نتایج تحلیل برگشتی کاهش می‌یابد. برای حل این مشکل باید محدوده تغییرات پارامترهای ورودی سیستم را در بازه‌ای منطقی که توسط بررسی شرایط ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی منطقه مورد نظر مشخص می‌گردد، تعیین نمود.

• می‌توان با در نظر گرفتن هم‌زمان نتایج قرائت‌های همگرایی سنج‌ها، کشیدگی سنج‌ها و نشست سنج‌ها برای تحلیل برگشتی هوشمند، احتمال یکتایی نتایج تحلیل برگشتی را شدیداً افزایش داد.

• یک سیستم برای تحلیل برگشتی هوشمند در متروی خط ۲ کرج با پارامترهای برگزیده شامل مدول الاستیسیته، چسبندگی و نسبت تنش‌ها توسط سیستم‌های فازی ارائه شد و نتایج حاصل از بررسی سیستم‌ها در ۲۰ ایستگاه نشست سنجی نشان دادند که سیستم‌های فازی طراحی شده، با معیار MSE ۰/۰۲۹ برای سیستم فازی طراحی شده با روش آموزش گرادیان نزولی، ۰/۰۰۶۵ برای سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO و ۰/۰۳۵۵ برای سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم رقابت استعماری، از عملکرد بسیار خوبی برخوردار می‌باشند و سیستم فازی طراحی شده با الگوریتم PSO با معیار MSE ۰/۰۰۶۵ از بهترین عملکرد جهت تحلیل برگشتی هوشمند، برخوردار می‌باشد.

۵-۳- پیشنهادات

- در این مطالعه به دلیل نبود ایستگاه‌های کامل رفتار سنجی شامل همگرایی سنج‌ها، کشیدگی سنج‌ها و نشست سنج‌ها در یک ایستگاه، تنها از نتایج ابزارهای نشست سنجی استفاده شد. با توجه به این که می‌توان با در نظر گرفتن هم‌زمان نتایج قرائت‌های همگرایی سنج‌ها، کشیدگی سنج‌ها و نشست سنج‌ها برای تحلیل برگشتی هوشمند، احتمال یکتایی نتایج تحلیل برگشتی را شدیداً افزایش داد، پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های مشابه ایستگاه‌های کامل رفتار سنجی ایجاد گردند.
- با توجه به عملکرد خوبی که سیستم‌های نروفازی از خود نشان داده‌اند، پیشنهاد می‌شود برای تحلیل برگشتی هوشمند مورد استفاده قرار گیرند.
- با توجه به شباهت زیاد سطح مقطع تونل‌های مترو در شهرهای تهران و کرج، پیشنهاد می‌شود با جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی گسترده، سیستمی جامع برای تحلیل برگشتی هوشمند تونل‌های مترو در این دو شهر طراحی گردد.
- با توجه به قابلیت الگوریتم‌های تکاملی در تعیین نوع توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی هم‌زمان با طراحی سیستم فازی، پیشنهاد می‌شود از این قابلیت برای افزایش دقت سیستم فازی استفاده شود.

منابع فارسی

- ۱) آتش‌پز گرگری ا.، (۱۳۸۷)، " توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- ۲) اعصاری م.، (۱۳۸۴)، "تحلیل پایداری مغار نیروگاه لوارک به روش تحلیل برگشتی با استفاده از رگرسیون چند متغیره"، پایان نامه تحصیلی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران
- ۳) بیدگلی م.، شهریار ک.، ۱۳۸۳، "معرفی روشی جهت تعیین ژئومکانیکی منطقه به کمک روش‌های عددی"، اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، صفحه ۱۷۵۱-۱۷۶۳.
- ۴) خسروتاش م.، تسکین دوست م.، کشفی م.، (۱۳۸۶)، "گزارش تفصیلی رفتار سنجی در حین احداث تونل، قطعه اول خط ۲ قطار شهری کرج و حومه".
- ۵) شاهوردیلو م.، "روش کاربرد همگرایی سنجی در بررسی رفتار سازه‌های زیر زمینی"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۶) شکرزاده م.، جعفری ا.، ۱۳۸۲، "تخمین پارامترهای مکانیکی توده سنگ با استفاده از تحلیل برگشتی هوشمند"، ششمین کنفرانس تونل، دانشگاه علم و صنعت ایران، صفحه ۹۹-۱۰۷.
- ۷) شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۶)، "گزارش ژئوتکنیک خط ۲ متروی قطار شهری کرج".
- ۸) شرکت مشاور مهندسی هگزا، (۱۳۸۶)
- ۹) شرکت مهندسی دریاخاک پی، (۱۳۸۴)، "گزارش مطالعات ژئوتکنیک در مسیر قطعه دوم خط مصوب قطار شهری کرج و حومه".
- ۱۰) شرکت مهندسی مشاور ایران خاک، (۱۳۸۴)، "گزارش خدمات مهندسی ژئوتکنیک پروژه قطار شهری کرج و حومه".
- ۱۱) جمشاسب ف.، (۱۳۸۵)، "تحلیل پایداری تونل‌های کم عمق با استفاده از نتایج رفتار

سنجی، مطالعه موردی تونل‌های دو قلوئی قطعه اول جنوبی متروی اصفهان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۱۲) قدیری ذ.، (۱۳۸۹)، "تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتارسنجی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۱۳) قیاسی فریز ج.، (۱۳۸۹)، "تخمین تخلخل سنگ مخزن از آنالیز تصاویر مقاطع نازک و مقایسه نتایج بدست آمده با سایر روشهای پتروفیزیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۱۴) گزارش سازمان قطار شهری کرج و حومه، (۱۳۸۴)، اجرای عملیات ساختمانی قطعه اول قطار شهری کرج

۱۵) گزارش ابزار دقیق سازمان قطار شهری کرج، شرکت مهندسی مشاور تونل راد، (۱۳۸۹)

۱۶) مدنی ح.، ۱۳۸۱، "تونل‌سازی جلد چهارم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۱۷) مدنی ح.، ۱۳۷۹، "تونل‌سازی جلد سوم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۱۸) وبگاه مرکز آمار ایران، فایل اطلاعات جمعی استان تهران

منابع خارجی

- 1) Atashpaz-gargari E., Lucas C., (2007), "**imperialist competitive algorithm: An Algorithm For Optimization Inspired by Imperialistic Competition**", IEEE.
- 2) Alcalá-Fdez J., Alcalá R., Gacto M.J., Herrera F., (2009), "**Learning the membership function contexts for mining fuzzy association rules by using genetic algorithms**", Fuzzy Sets and Systems, VOL. 160, PP. 905-921.
- 3) Akutagawa S., Sakurai S., (2003), "**Back Analysis for Tunnel Engineering as a Modern Observational Method**", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, Published by Elsevier Ltd, PP. 185-196.
- 4) Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R., (1986), "**Soil Moments Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures**", Blackies and Sons Ltd., London.
- 5) Bieniawski Z.T., (1984), "**Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling**", A.A. Balkema publishing co.
- 6) Brady B.H.D., Brown E.T., (1992), "**Rock Mechanics for Underground Mining**", Second edition, Chapman & Hall, USA.

- 7) Cordon O., Gomide F., Herrera F., Hoffmann F., Magdalena L., (2004), "**Ten years of genetic fuzzy systems: current framework and new trends**", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 141, PP. 5-31.
- 8) Cordon O., Herrera F., Villar P., (2001), "**Generating the Knowledge Base of a Fuzzy Rule-Based System by the Genetic Learning of the Data Base**", IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 9, NO. 4.
- 9) Cordon O., Herrera F., Hoffmann F., Magdalena L., (2001), "**GENETIC FUZZY SYSTEMS**", Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory, Vol. 19, World Scientific.
- 10) Cordon O., Herrera F., Villar P., (2000), "**Analysis and guidelines to obtain a good uniform fuzzy partition granularity for fuzzy rule-based systems using simulated annealing**", International Journal of Approximate Reasoning, VOL. 25, PP. 187-215.
- 11) Duncncliff J., Green Gordon E., (1988), "**Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field**", performance, J. Wiley & Sons.
- 12) Espinosa J., Vandewalle J., Wertz V., (2005), "**Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control**", Springer.
- 13) Eberhart R.C., Shi Y., (2001), "**Particle Swarm Optimization: Development, Application and resources**", IEE.
- 14) Eberhart R.C., Kennedy J., (1995b), "**A New Optimizer Using Particles Swarm Theory**", Pro, Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.
- 15) Goida G., Sakurai S., (1986), "**Back Analysis Procedures for Interpretation of Field Measurements in Geomechanics**", vol.11, PP.555-583.
- 16) Gonzalez J., Rojas I., Pomares H., Herrera L.J., Guillen A., Palomares J.M., (2007), "**Improving the accuracy while preserving the interpretability of fuzzy function approximators by means of multi-objective evolutionary algorithms**", International Journal of Approximate Reasoning, VOL. 44, PP. 32-44.
- 17) Gioda G., (1985), "**Some Remarks on Back Analysis and Characterization Problem in Geomechanics**", Fifth int. Conf. On Numerical Methods in Geomechanics, Nagaya, Japan.
- 18) Hisatake M., (1986), "**Three Dimensional Back Analysis for Tunnels**", Proc. of the Int. Symp. On Engineering in Complex Rock Formation, China.
- 19) Hu X., Shi Y., Eberhart R.C., (2004), "**Recent Advance in Particle Swarm**", IEEE Congress on Evolutionary Computation, VOL. 1, PP. 90-97.
- 20) Huton D.V., (2004), "**Fundamentals of Finite Elemance Analysis**" McGrewhill pub.
- 21) Hudson J.A., (1992), "**Comprehensive rock engineering**", pp.543-562.

22) Jin Y., Seelen W., Sendhoff B., (1999), ***“On Generating FC Fuzzy Rule Systems from Data Using Evolution Strategies for fuzzy rule-based systems using simulated annealing”***, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, VOL. 29, NO. 6.

23) Joen Y.S., Yang H.S., (2004), ***“Development of a Back Analysis Algorithm Using FLAC”***, Korea, International Journal of Rock Mechanical and Mining Sciences, Vol.41, No 3,

24) Jiang A.N., Wang S.Y., Tang S.L., (2011), ***“Feedback analysis of tunnel construction using a hybrid arithmetic based on Support Vector Machine and Particle Swarm Optimisation”***, Automation in Construction, Vol. 20, Published by Elsevier Ltd, PP. 482-489.

25) Kennedy J., Eberhart R.C., (1995a), ***“Particle Swarm Optimization”***, IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.

26) Kaveh A., Talatahari S., (2010), ***“Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm”***, Computers and Structures, VOL. 88, PP. 1220-1229.

27) Kaisar P.K. & Zou D. & Lang P.A., (1998), ***“Stress Determination by Back Analysis of Excavation-Induced Stress Change ”***, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 23, pp. 165- 200.

28) Kennedy J., (1997), ***“The Particle Swarm: Social Adaptation of Knowledge”***, IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Indianapolis, Indiana, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.

29) Li S., Yang J., Hao W., Shang Y., (2006), ***“Intelligent back-analysis of displacements monitored in tunneling”***, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, Published by Elsevier Ltd, PP. 1118-1127.

30) Lee J.H., Akutagawa S., Yokota Y., (2008), ***“Back analysis of linear and nonlinear ground behaviors around shallow tunnel by using artificial neural network”***, Doboku Gakkai Ronbunshuu F, Vol. 64, No. 4, PP. 431-449.

31) Li C., Wu T., (2011), ***“Adaptive fuzzy approach to function approximation with PSO and RLSE”***, Expert Systems with Applications, VOL. 38, PP. 13266-13273.

32) Leung R.W.K., Lau H.C.W., Kwong C.K., (2003), ***“An expert system to support the optimization of ion plating process: an OLAP-based fuzzy-cum-GA approach”***, Expert Systems with Applications, VOL. 25, PP. 313-330.

33) Li, Shihui, Yang, Jie, Hao, Weidong, Yangjon, Shang, (2002), ***“Intelligent Back - Analysis of Displacement Using Precedent Type Analysis for Tunneling”***, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.43, Issue 7, page 1118- 1127.

34) Miranda T., Dias D., Eclaircy-Caudron S., Correia A.G., Costa L., (2011), **“Back analysis of geomechanical parameters by optimisation of a 3D model of an underground structure”**, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 26, PP. 659-673, Published by Elsevier Ltd.

35) Plaxis Tunnel 3D, (2001), **“Reference Manual”**, VERSION 1.

36) Roy S.S., (2006), **“Design of genetic-fuzzy expert system for predicting surface finish in ultra-precision diamond turning of metal matrix composite”**, Journal of Materials Processing Technology, VOL. 173, PP. 337-344.

37) Sakurai S., (1993), **“Back Analysis in Rock Engineering”**, Comprehensive Rock Engineering, Vol. 4, ed J.A. Hudson, (pergamon), pergamon press, London, pp.453- 469.

38) Sinha R.S., (1989), **“Underground Structure Design and Instrument”**, University of Michigan, Publisher be Elsevier geoscience, London.

39) Sakurai S., Takeuchi K., (1983), **“Back Analysis in Measurements in Tunneling”**, Rock Mechanics ock Eng. 16, 173-180.

40) Sadigh A.N., Mozafari M., Karimi B., (2011), **“Manufacturer–retailer supply chain coordination: A bi-level programming approach”**, Advances in Engineering Software, ARTICLE IN PRESS.

41) Shang Y.J., Cai J.G., Hao W.D., Wu X.Y., Li S.H., (2002), **“Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling”**, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17, Published by Elsevier Ltd, PP. 381-389.

42) Siavanandam S.N., Sumathi S., Deepa S.N., (2007), **“Introduction to fuzzy logic using Matlab ”**, Springer, 430pp.

43) Shi Y., Eberhart R.C., (1998), **“Parameter Selection in Particle Swarm Optimization”**, Indiana University Purdue University Indianapolis.

44) Sigh, Bhawani, Goel, Rajnish K.,(2006), **“Tunneling in Weak Rocks”**, UK., Elsevier Geo. Engineering Book Series, Vol.5,pp. 230- 235.

45) Shang Y.J., Hao w.D., (2002),” **Intelligent Back Analysis of Displacement Using Precedent Type Analysis for Tunneling”**, Puhlised by Elsevir Ltd.

46) Tanimoto C. & Fujiwara T. & et al., (1998),**“Determination of Rock Mass Strength through Convergence Measurements in Tunneling”**, 2 nd Int. Symp. On Field Measurements in Geomechanics.

47) Wu W.C., Tasi M.S., (2008), **“Feeder Reconfiguration Using Binary Coding Particle Swarm Optimization”**, International Journal of Control, Automation, and Systems, VOL. 6, NO. 4, PP. 488-494.

48) Wang L.X., (1997), **“A Course in Fuzzy Systems and Control”**, Prentice-Hall International, Inc.

49) Wang Z.L., Li Y., Shen R.F., (2007), **“Correction of soil parameters in calculation of embankment settlement using a BP network back-analysis model”**, Engineering Geology, Vol. 19, Published by Elsevier Ltd, PP. 168-177.

50) Yagar R.R., Zadeh L.A., (1992), **“An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems”**, vol. 165, Kluwer Academic Publishers, PP. 69-70.

51) Yu Y., Zhang B., Yuan H., (2007), **“An intelligent displacement back-analysis method for earth-rockfill dams”**, Computers and Geotechnics, Vol. 34, Published by Elsevier Ltd, PP. 423-434.

52) Yang C.H., Wu Y.H., Hon T., (2010), **“A no-tension elastic–plastic model and optimized back-analysis technique for modeling nonlinear mechanical behavior of rock mass in tunneling”**, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, Published by Elsevier Ltd, PP. 279-289.

53) Ying H., (2000), **“Fuzzy Control and Modeling”**, Wiley-IEEE Press.

54) Zadeh L.A., (1965), **“Fuzzy sets”**. Information and Control 8, PP. 338–353.

55) Zhifa Y., Lee C.F.,(2000), **“Three- Dimensional Back Analysis of Displacement in Exploration Adits- Principles and Application”**, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.37, Published by Elsevier Ltd, PP.525- 533.

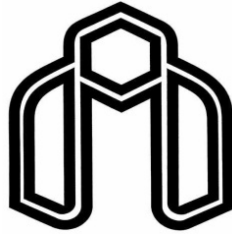
56) Zhao H.B., Yin S., (2009), **“Geomechanical parameters identification by particle swarm optimization and support vector machine”**, Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, Published by Elsevier Ltd, PP. 3997-4012.

57) Zhang LQ., Yue Z.Q., Yang ZF., Qi J.X., & Liu F.C., (2006), **“A Displacement- Based Back Analysis Method for Rock Mass Modulus and Horizontal in Situ Stress in Tunneling- Illustrated with a Case Study”**, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.21, Issue 6, Page 636- 649.

Abstract

Displacement back analysis is commonly used in establishing geomechanical parameters in rock mechanics and engineering. There are mainly three types of displacement back analysis methods: inverse solving method, atlas method and direct (i.e. optimal) method. Because of the special advantages, the optimal methods are more and more extensively employed in solving engineering problems. For example, Levenber–Marquardt method, Gauss–Newton method, Bayesian method, Powell method, Rosenbork method, and genetic algorithm have been proposed to obtain optimal values of parameters from measured displacement data. Neural network and genetic algorithm were applied to geotechnical engineering back analysis. However, there are still two problems associated with the optimal method unresolved completely. One is that the relation between the displacement and the mechanical parameters is highly non-linear and complex. Another is that the search for the estimated parameter values is in a large space and is highly multi-modal.

In this research, three fuzzy systems used for representing the relation between the displacement and the particle swarm optimization, the imperialistic competitive algorithm and the gradient descent training used for tuning this three fuzzy systems. The particle swarm optimization and the imperialistic competitive algorithm used for searching for the estimated parameter values. By using this three method, the estimation of the geomechanical parameters at the karaj subway, line 2 illustrated. The results showed the fuzzy system tuned by the particle swarm optimization with the Mean sum of Squares of the Errors (MSE) of 0.0065 had the best performance.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Master of Science in mining Exploitation Engineering

Intelligent Back-Analysis of Karaj subway line 2, using Fuzzy Systems

Hossein khamesi

Supervisors:

Dr. S.R. Torabi

Dr. H. Mirzaii Nasirabad

Advisors:

ENGINEER S. Azargoshasb

Winter, 2012